



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

# TRABAJO FINAL DE MÁSTER

## **Título:**

*Estudio del efecto del bruñido asistido por vibraciones en las tensiones residuales, rugosidad y dureza*

## **Autor:**

*Manel Madueño Guerrero*

## **Titulación:**

*Máster Universitario en Ingeniería Industrial*

*Especialidad Mecánica*

**Director:** Dr. Jordi Romeu Garbí

**Codirector:** Dr. Ramón Jerez Mesa

**Convocatoria:** Junio de 2018



<b>Título:</b>	Estudio del efecto del bruñido asistido por vibraciones en las tensiones residuales, rugosidad y dureza.
<b>Autor:</b>	Manel Madueño Guerrero
<b>Directores:</b>	Jordi Romeu Garbí Ramón Jerez Mesa
<b>Convocatoria:</b>	Junio de 2018
<b>Titulación:</b>	Máster Universitario en Ingeniería Industrial Especialidad Mecánica
<b>Prólogo:</b>	<p>El presente trabajo se basa en el estudio del efecto producido en las tensiones residuales presentes en los materiales tras la aplicación del proceso de bruñido asistido por vibraciones, además de la caracterización de otros parámetros superficiales.</p> <p>Para ello, en una primera parte de la experimentación se mecanizarán probetas de acero y aluminio. Sobre la mitad de las probetas se aplicará bruñido convencional, mientras que sobre la otra mitad se aplicará bruñido asistido por vibraciones, con el fin efecto de realizar una comparativa de los efectos inducidos por ambos procesos.</p> <p>La superficie de las probetas se caracterizará en cuanto a rugosidad y dureza se refiere. Por otra parte, el estudio de las tensiones residuales a pequeñas profundidades será llevado a cabo mediante la innovadora técnica del taladro incremental.</p>
<b>Palabras clave:</b>	Bruñido asistido por vibraciones, rugosidad superficial, dureza, fatiga, tensiones residuales, método del taladro incremental, acero, aluminio.





# Agradecimientos

Para empezar, quería dar las gracias a mi director de proyecto Jordi Romeu que desde un primer momento se mostró predispuesto a trabajar conmigo en este trabajo tan ambicioso y estableciendo el enlace entre la ESEIAAT y el campus EEBE de Barcelona, donde se ha llevado a cabo la experimentación.

Por supuesto, también agradecer a Antonio Travieso por darme la oportunidad de aportar mi granito de arena en el estudio del proceso de bruído, en el que tantas y tantas horas hemos invertido.

No sin menos importancia reconocer la implicación de Ramón Jerez desde un primer momento en el desarrollo del presente trabajo, probablemente en el momento de su carrera que más ocupado estaba, postulándose como un director más del trabajo durante estos seis meses.

También agradecer a los compañeros del DEFAM, Jordi Llumà y Jordi Jorba, por involucrarse en la realización del estudio. Asimismo, agradecer a Giovanni Gómez, el primero en introducirme en el mundo del bruído y siempre predispuesto a ayudar, así como a mi compañero de estudios y de trabajo Oriol Casadesús, con el que tantas penurias y a la vez alegrías he vivido.

Como no, dedicar unas palabras a mis queridísimos padres Loli y Manolo por apoyarme durante estos seis largos años de vida universitaria, tanto en el ámbito personal como en el económico.

Por último, gracias Eva, por apoyarme desde un primer momento y en todas las decisiones tomadas, por estar detrás de todas y cada una de las palabras plasmadas en este trabajo, por alentarme en mis momentos de flojera y animarme todo el tiempo y, simplemente, por estar siempre a mi lado. Gracias, eres la mejor.

# Resum

El present projecte desenvolupa un estudi experimental de l'efecte que produeix l'aplicació del brunyit amb bola com a procés d'acabat sobre superfícies metàl·liques; més en concret, l'estudi es centra en l'efecte que genera l'aplicació de la tècnica sobre l'estat tensional del material tractat, així com la modificació en la topologia superficial i la duresa. Per fer-ho s'utilitza una eina de brunyit dotada de mòdul de vibracions ultrasòniques que ofereix la possibilitat d'assistir al procés mitjançant vibracions.

L'experiment es basa en l'estudi comparatiu de dos materials: acer AISI1038 i alumini AA2017-T4. Tots dos materials es tracten amb la tècnica del brunyit amb bola, sent determinants la direcció de passada i l'assistència mitjançant vibracions sobre els resultats de l'experiment, mantenint fixos la resta de paràmetres.

Els resultats es centren en la caracterització superficial dels materials citats. D'una banda, es quantifica el canvi produït sobre la textura superficial del material després de l'aplicació de la tècnica, observant millores substancials respecte a la superfície mecanitzada original. Aquest procés es porta a terme en un mesurador de perfils òptic per a l'obtenció dels principals paràmetres que caracteritzen la textura del material. A més, es prenen valors de la duresa a petites profunditats mitjançant un duròmetre Vickers. D'altra banda, el principal objectiu del projecte es centra en avaluar les tensions residuais compressives que indueix la tècnica del brunyit sobre els materials experimentats. Per fer-ho s'implementa la tècnica del IHD (incremental hole drilling) que quantifica la relaxació de tensions després del mecanitzat d'un trepant centrat en una roseta de tres galgues extensiomètriques i perpendicular a la superfície del material. D'aquesta manera, es quantifica l'efecte que indueix el brunyit sobre l'estat tensional compressiu del material com a paràmetre determinant de la vida a fatiga dels components mecànics, una de les principals causes de fallada en aplicacions industrials.

Les conclusions del present projecte proposen combinacions de paràmetres per al procés en funció de la característica superficial sobre la qual es vulgui incidir.

# Resumen

El presente proyecto desarrolla un estudio experimental del efecto que produce la aplicación del bruñido con bola como proceso de acabado sobre superficies metálicas; más en concreto, el estudio se centra en el efecto que genera la aplicación de la técnica sobre el estado tensional del material tratado, así como la modificación en la topología superficial y la dureza. Para ello se utiliza una herramienta de bruñido dotada de módulo de vibraciones ultrasónicas que ofrece la posibilidad de asistir al proceso mediante vibraciones.

El experimento se basa en el estudio comparativo de dos materiales: acero AISI1038 y aluminio AA2017-T4. Ambos materiales se tratan con la técnica del bruñido con bola, siendo determinantes la dirección de pasada y la asistencia mediante vibraciones sobre los resultados del experimento, manteniendo fijos el resto de parámetros.

Los resultados se centran en la caracterización superficial de los materiales citados. Por una parte, se cuantifica el cambio producido sobre la textura superficial del material tras la aplicación de la técnica, observando mejoras sustanciales respecto a la superficie mecanizada original. Dicho proceso se lleva a cabo en un medidor de perfiles óptico para la obtención de los principales parámetros que caracterizan la textura del material. Además, se toman muestras de dureza a pequeñas profundidades mediante el uso de un durómetro Vickers. Por otra parte, el principal objetivo del proyecto se centra en evaluar las tensiones residuales compresivas que induce la técnica del bruñido sobre los materiales experimentados. Para ello se implementa la técnica del IHD (*incremental hole drilling*) que cuantifica la relajación de tensiones tras el mecanizado de un taladro centrado en una roseta de tres galgas extensiométricas y perpendicular a la superficie del material. De este modo, se cuantifica el efecto que induce el bruñido sobre el estado tensional compresivo del material como parámetro determinante de la vida a fatiga de los componentes mecánicos, una de las principales causas de fallo en aplicaciones industriales.

Las conclusiones del presente proyecto proponen combinaciones de parámetros para el proceso en función de la característica superficial sobre la cual se desee incidir.

# Abstract

The present project develops an experimental study of the effect produced by the application of ball burnishing as a finishing process on metal surfaces; more specifically, the study focuses on the effect generated by the application of the technique on the tensional state of the treated material, as well as the modification in the surface topology and the hardness. For this, a burnishing tool equipped with an ultrasonic vibration module is used, which offers the possibility of assisting the process through vibrations.

The experiment is based on the comparative study of two materials: AISI1038 steel and aluminum AA2017-T4. Both materials are treated with the ball-burnishing technique, being the burnishing direction and the vibration assistance decisive on the results of the experiment, keeping the rest of the parameters fixed.

The results focus on the surface characterization of the materials cited. On the one hand, the change produced on the surface texture of the material after the application of the technique is quantified, showing substantial improvements with respect to the original machined surface. This process is carried out in an optical profilometer to obtain the main parameters that characterize the texture of the material. Moreover, hardness values are determined by the use of a Vickers durometer. On the other hand, the main objective of the project focuses on evaluating the residual compressive stresses induced by the burnishing technique on the materials tested. To this end, the IHD (incremental hole drilling) technique is implemented, which quantifies stress relaxation after drilling a centered hole on a three-gauge rosette and perpendicular to the surface of the material. In this way, the effect that the burnishing induces on the compressive tension state of the material is quantified as a determinant parameter of the fatigue life of the mechanical components, one of the main causes of failure in industrial applications.

The conclusions of the present project propose combinations of parameters for the process depending on the surface characteristic on which it is desired to influence.

# Tabla de contenidos

1. Introducción.....	20
1.1. Motivación y justificación del proyecto.....	20
1.2 Objeto del proyecto.....	21
1.3 Alcance del proyecto .....	21
1.4 Requerimientos.....	22
2. Estado del arte .....	23
2.1 Operación de bruñido .....	23
2.2 Asistencia por vibraciones .....	28
2.3 Efectos tras la aplicación del bruñido .....	31
2.3.1 Rugosidad y textura superficial .....	32
2.3.2 Perfil de durezas .....	34
2.3.3 Tensiones residuales .....	35
2.3.3.1 Tipos de tensiones residuales .....	35
2.3.3.2 Métodos para la cuantificación de tensiones residuales .....	36
2.4 Objetivos a partir del estado del arte .....	41
3. Descripción del proceso experimental .....	42
3.1 Diseño del experimento .....	42
3.2 Caracterización de los materiales.....	44
3.2.1 Acero AISI1038 .....	44
3.2.2 Aluminio AA2017-T4 .....	45
3.3 Ejecución del experimento.....	45
3.3.1 Mecanizado de las probetas .....	46
3.3.2 Bruñido de las superficies .....	48
3.3.2.1 Descripción de la herramienta de bruñido utilizada.....	48
3.3.2.2 Calibración de la herramienta.....	50
3.3.2.3 Aplicación del proceso.....	51
3.4 Adquisición de los parámetros superficiales.....	52
3.4.1 Evaluación de la topología superficial .....	53
3.4.2 Evaluación de la dureza.....	56
3.4.3 Evaluación de las tensiones residuales .....	57
4. Resultados y cálculos derivados del proceso experimental.....	63
4.1 Textura superficial .....	63
4.1.1 Acero AISI1038 .....	64

4.1.2 Aluminio AA2017-T4 .....	66
4.1.3 Comparativa de los resultados entre los materiales .....	69
4.2 Perfil de durezas .....	70
4.2.1 Aluminio AA2017-T4 .....	71
4.3 Tensiones residuales .....	72
4.3.1 Aplicación del método y cálculos .....	73
4.3.2 Acero AISI1038 .....	75
4.3.2.1 Tensiones residuales en acero AISI1038 a mayor profundidad .....	78
4.3.3 Aluminio AA2017-T4 .....	79
4.3.4 Comparativa de los resultados entre los materiales .....	81
5. Conclusiones .....	83
6. Prospectiva y trabajos futuros .....	85
7. Bibliografía .....	87
Anexo 1. Presupuesto .....	91
Anexo 2. Fichas técnicas de los materiales ensayados .....	95
A2.1 Acero AISI1038 .....	95
A2.2 Aluminio AA2017-T4 .....	96
Anexo 3. Programas de mecanizado .....	97
A3.1 Mecanizado hemisférico .....	97
A3.2 Bruñido (5 pasadas) .....	97
A3.3 Método del taladro incremental (IHD) .....	100
Anexo 4. Resultados de rugosidad y textura superficial .....	101
A4.1 Acero AISI1038 .....	101
A4.2 Aluminio AA2017-T4 .....	104
Anexo 5. Imágenes de la textura superficial .....	107
A5.1 Acero AISI1038 .....	107
A5.2 Aluminio AA2017-T4 .....	110
Anexo 6. Gráficas de tensiones residuales .....	113
A6.1 Acero AISI1038 .....	113
A6.1.1 Elongaciones galgas extensiométricas .....	113
A6.1.2 Tensiones principales incrementales .....	117
A6.1.3 Tensión equivalente de Von Mises .....	121
A6.2 Aluminio AA2017-T4 .....	124
A6.2.1 Elongaciones galgas extensiométricas .....	124
A6.2.2 Tensiones principales incrementales .....	126
A6.2.3 Tensión equivalente Von Misses .....	129

# Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquematación del proceso de bruñido con bola [5].....	24
<b>Figura 2.</b> Herramienta de bruñido estándar regulada por muelle [14].....	25
<b>Figura 3.</b> Detalle del contacto entre la bola de bruñido y la superficie tratada [12] .....	26
<b>Figura 4.</b> Configuraciones para el proceso de bruñido según la máquina empleada y el tipo de indentador [28].....	26
<b>Figura 5.</b> Inspección visual del efecto producido tras la aplicación del bruñido .....	27
<b>Figura 6.</b> Reducción de la fuerza necesaria para la deformación de distintos materiales debido a la introducción de vibraciones; a) Acero. b) Cobre. c) Aleación de aluminio [21].....	29
<b>Figura 7.</b> Esquematación de la herramienta ideada por Gómez-Gras [10] .....	30
<b>Figura 8.</b> Módulo vibratorio de la herramienta de bruñido patentada por Jerez-Mesa [22].....	31
<b>Figura 9.</b> Comparación de la rugosidad obtenida tras diferentes técnicas de acabado [33]...	33
<b>Figura 10.</b> Incremento del valor de dureza en aluminio para diferentes valores de fuerza de bruñido [25] .....	34
<b>Figura 11.</b> Tipos de tensiones residuales y principales causas de su aparición [39].....	36
<b>Figura 12.</b> Modelo de roseta RY comercializado por la empresa HBM para la cuantificación de tensiones residuales .....	39
<b>Figura 13.</b> Resultados de tensiones residuales sobre acero AISI1038 tras el bruñido a distintas profundidades del material medidas por el método IHD [13].....	41
<b>Figura 14.</b> Esquematación de la distribución de las huellas de bruñido en la superficie .....	43
<b>Figura 15.</b> En la izquierda, dinamómetro KISTLER 9757B. En la derecha, fresadora LAGUN 600 con control CNC Fagor .....	46
<b>Figura 16.</b> Detalle de la superficie obtenida tras el mecanizado con fresa hemisférica .....	47
<b>Figura 17.</b> Esquematación de la herramienta de bruñido utilizada, diseñada por Jerez-Mesa [22] .....	48
<b>Figura 18.</b> Esquematación del módulo de transmisión de fuerza de la herramienta diseñada por Jerez-Mesa [22].....	50
<b>Figura 19.</b> Recta de calibración para la herramienta de bruñido.....	51
<b>Figura 20.</b> Huellas de bruñido. En la izquierda, probeta de aluminio AA2017-T4; en la derecha, probeta de acero AISI1038.....	52

<b>Figura 21.</b> Parametrización de topologías superficiales mediante curvas de Abbott-Firestone [22] .....	54
<b>Figura 22.</b> Esquematización del principio de cromatismo .....	55
<b>Figura 23.</b> Medidor de perfiles óptico STIL Single Point Optical Sensor.....	55
<b>Figura 24.</b> Durómetro Vickers Buehler 5114 y esquematización de la indentación [22] .....	56
<b>Figura 25.</b> Montaje de los terminales y pegado de las rosetas de galgas sobre el material de estudio .....	59
<b>Figura 26.</b> Conexión de las galgas con el Spider8-30.....	60
<b>Figura 27.</b> Mecanizado del taladro incremental sobre la probeta.....	61
<b>Figura 28.</b> Parámetros de textura media del acero AISI1038.....	64
<b>Figura 29.</b> Oblicuidad y curtosis del acero AISI1038.....	65
<b>Figura 30.</b> Cambio en la dirección de la textura principal tras la operación de bruñido en acero AISI1038. En la izquierda, superficie original; en la derecha, superficie bruñida. ....	66
<b>Figura 31.</b> Parámetros de textura media del aluminio AA2017-T4.....	67
<b>Figura 32.</b> Oblicuidad y curtosis del aluminio AA2017-T4.....	68
<b>Figura 33.</b> Cambio en la dirección de la textura principal tras la operación de bruñido en aluminio AA2014-T4. En la izquierda, superficie original; en la derecha, superficie bruñida. ....	69
<b>Figura 34.</b> Comparativa de dureza Vickers entre las distintas huellas de bruñido en aluminio AA2017-T4.....	71
<b>Figura 35.</b> Ejemplo de medida del incremento de elongación en las galgas extensiométricas durante la aplicación del método IHD .....	73
<b>Figura 36.</b> Ejemplo del incremento en las tensiones residuales principales en función de la profundidad .....	74
<b>Figura 37.</b> Ejemplo del incremento en la tensión equivalente de Von Mises en función de la profundidad .....	75
<b>Figura 38.</b> Comparativa del incremento en la tensión residual equivalente VM para cada una de las huellas de bruñido en acero AISI1038.....	76
<b>Figura 39.</b> Comparativa del incremento en las tensiones residuales compresivas en acero AISI1038 para mayor profundidad.....	78
<b>Figura 40.</b> Comparativa del incremento en la tensión residual equivalente VM para cada una de las huellas de bruñido en aluminio AA2017-T4.....	80
<b>Figura 41.</b> Textura superficial original del acero AISI1038.....	107
<b>Figura 42.</b> Textura superficial de la huella 1 del acero AISI1038.....	108
<b>Figura 43.</b> Textura superficial de la huella 2 del acero AISI1038.....	108



<b>Figura 44.</b> <i>Textura superficial de la huella 3 del acero AISI1038.....</i>	109
<b>Figura 45.</b> <i>Textura superficial de la huella 4 del acero AISI1038.....</i>	109
<b>Figura 46.</b> <i>Textura superficial original del aluminio AA2017-T4.....</i>	110
<b>Figura 47.</b> <i>Textura superficial de la huella 1 del aluminio AA2017-T4.....</i>	110
<b>Figura 48.</b> <i>Textura superficial de la huella 2 del aluminio AA2017-T4.....</i>	111
<b>Figura 49.</b> <i>Textura superficial de la huella 3 del aluminio AA2017-T4.....</i>	111
<b>Figura 50.</b> <i>Textura superficial de la huella 4 del aluminio AA2017-T4.....</i>	112
<b>Figura 51.</b> <i>Elongación de las galgas en la superficie original del acero AISI1038 .....</i>	113
<b>Figura 52.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella 1 del acero AISI1038 .....</i>	114
<b>Figura 53.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella 2 del acero AISI1038 .....</i>	114
<b>Figura 54.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella 3 del acero AISI1038 .....</i>	115
<b>Figura 55.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella 4 del acero AISI1038 .....</i>	115
<b>Figura 56.</b> <i>Elongación de las galgas en la superficie original del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm).....</i>	116
<b>Figura 57.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella con pasadas paralelas del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm).....</i>	116
<b>Figura 58.</b> <i>Elongación de las galgas en la huella con pasadas perpendiculares del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm) .....</i>	117
<b>Figura 59.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de superficie original acero AISI1038 ..</i>	117
<b>Figura 60.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella 1 del acero AISI1038 .....</i>	118
<b>Figura 61.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella 2 del acero AISI1038 .....</i>	118
<b>Figura 62.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella 3 del acero AISI1038 .....</i>	119
<b>Figura 63.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella 4 del acero AISI1038 .....</i>	119
<b>Figura 64.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la superficie original del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm).....</i>	120
<b>Figura 65.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella con pasadas paralelas del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm) .....</i>	120
<b>Figura 66.</b> <i>Incremento en las tensiones principales de la huella con pasadas perpendiculares del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm).....</i>	121
<b>Figura 67.</b> <i>Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la superficie original del acero AISI1038 .....</i>	121
<b>Figura 68.</b> <i>Incremento en la tensión equivalente de VM en la huella 1 del acero AISI1038.</i>	122
<b>Figura 69.</b> <i>Incremento en la tensión equivalente de VM en la huella 2 del acero AISI1038.</i>	122

<b>Figura 70.</b> Incremento en la tensión equivalente de VM en la huella 3 del acero AISI1038.	123
<b>Figura 71.</b> Incremento en la tensión equivalente de VM en la huella 4 del acero AISI1038.	123
<b>Figura 72.</b> Elongación de las galgas en la superficie original del aluminio AA2017-T4 .....	124
<b>Figura 73.</b> Elongación de las galgas en la huella 1 del aluminio AA2017-T4 .....	124
<b>Figura 74.</b> Elongación de las galgas en la huella 2 del aluminio AA2017-T4 .....	125
<b>Figura 75.</b> Elongación de las galgas en la huella 3 del aluminio AA2017-T4 .....	125
<b>Figura 76.</b> Elongación de las galgas en la huella 4 del aluminio AA2017-T4 .....	126
<b>Figura 77.</b> Incremento en las tensiones principales de la superficie original del aluminio AA2017-T4 .....	126
<b>Figura 78.</b> Incremento en las tensiones principales de la huella 1 aluminio AA2017-T4 .....	127
<b>Figura 79.</b> Incremento en las tensiones principales de la huella 2 aluminio AA2017-T4 .....	127
<b>Figura 80.</b> Incremento en las tensiones principales de la huella 3 aluminio AA2017-T4 .....	128
<b>Figura 81.</b> Incremento en las tensiones principales de la huella 4 del aluminio AA2017-T4	128
<b>Figura 82.</b> Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la superficie original del aluminio AA2017-T4 .....	129
<b>Figura 83.</b> Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 1 del aluminio AA2017-T4 .....	129
<b>Figura 84.</b> Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 2 del aluminio AA2017-T4 .....	130
<b>Figura 85.</b> Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 3 del aluminio AA2017-T4 .....	130
<b>Figura 86.</b> Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 4 del aluminio AA2017-T4 .....	131

# Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Estudios relacionados con el bruñido mediante TPMC.....	32
<b>Tabla 2.</b> Resumen de las principales técnicas para la medición de tensiones residuales .....	38
<b>Tabla 3.</b> Composición en peso del acero AISI1038 .....	44
<b>Tabla 4.</b> Propiedades del acero AISI1038 .....	44
<b>Tabla 5.</b> Composición en peso del aluminio AA2017-T4.....	45
<b>Tabla 6.</b> Propiedades del aluminio AA2017-T4 .....	45
<b>Tabla 7.</b> Parámetros seleccionados para el planeado de la superficie.....	46
<b>Tabla 8.</b> Parámetros para planeado con fresa hemisférica.....	47
<b>Tabla 9.</b> Parámetros constantes para la operación de bruñido .....	52
<b>Tabla 10.</b> Parámetros S definidos en la norma ISO 25178 [11].....	54
<b>Tabla 11.</b> Parámetros utilizados en el mecanizado del taladro incremental .....	61
<b>Tabla 12.</b> Dirección de la textura principal en las huellas de bruñido del acero AISI1038.....	66
<b>Tabla 13.</b> Dirección de la textura principal en huellas de bruñido del aluminio AA2017-T4....	69
<b>Tabla 14.</b> Partida presupuestaria 1.....	91
<b>Tabla 15.</b> Partida presupuestaria 2.....	92
<b>Tabla 16.</b> Partida presupuestaria 3.....	92
<b>Tabla 17.</b> Partida presupuestaria 4.....	93
<b>Tabla 18.</b> Partida presupuestaria 5.....	93
<b>Tabla 19.</b> Partida presupuestaria 6.....	94
<b>Tabla 20.</b> Presupuesto total.....	94
<b>Tabla 21.</b> Propiedades del acero AISI1038 .....	96
<b>Tabla 22.</b> Propiedades del aluminio AA2017-T4 .....	96
<b>Tabla 23.</b> Valores de rugosidad y textura superficial iniciales en acero AISI1038.....	101
<b>Tabla 24.</b> Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 1 en acero AISI1038.....	102
<b>Tabla 25.</b> Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 2 en acero AISI1038.....	102
<b>Tabla 26.</b> Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 3 en acero AISI1038.....	103
<b>Tabla 27.</b> Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 4 en acero AISI1038.....	103
<b>Tabla 28.</b> Valores de rugosidad y textura superficial iniciales en aluminio AA2017-T4.....	104

**Tabla 29.** *Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 1 aluminio AA2017-T4.....* 104

**Tabla 30.** *Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 2 aluminio AA2017-T4.....* 105

**Tabla 31.** *Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 3 aluminio AA2017-T4.....* 105

**Tabla 32.** *Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 4 aluminio AA2017-T4.....* 106

# Lista de símbolos y acrónimos

## Abreviaturas

<i>BAV</i>	Bruñido asistido por vibraciones
<i>BNAV</i>	Bruñido no asistido por vibraciones
<i>CNC</i>	Control numérico convencional
<i>HV</i>	Dureza Vickers
<i>IHD</i>	Método del taladro incremental ( <i>incremental hole drilling</i> )
<i>TFMC</i>	Transmisión de fuerza por muelle comprimido
<i>ud</i>	Unidad

## Elementos químicos

<i>Al</i>	Aluminio
<i>C</i>	Carbono
<i>Fe</i>	Hierro
<i>Mg</i>	Magnesio
<i>Mn</i>	Manganeso
<i>P</i>	Fósforo
<i>S</i>	Azufre
<i>Si</i>	Silicio

## Parámetros

<i>A</i>	Área de incidencia de la bola de bruñido
<i>A, B</i>	Coeficientes geométricos de la galga para el cálculo de la TR

$A^*, B^*$	Coeficientes mecánicos del material para el cálculo de la TR
$a$	Radio del taladro en el método IHD
$\Delta \epsilon$	Incremento de elongación en la galga extensiométrica
$\Delta t$	Incremento de espesor de la placa piezoeléctrica
$\Delta z$	Incremento de desplazamiento vertical
$d$	Diagonal media de la indentación Vickers
$d_{33}$	Constante piezoeléctrica en el sentido longitudinal
$E$	Módulo elástico del material
$E_s$	Error estadístico de la distribución de t-student
$F_b$	Fuerza de bruñido
$F_o$	Fuerza de precarga de bruñido
$F_p$	Fuerza de presión de bruñido
$F_v$	Componente de fuerza vibratoria
$k$	Constante elástica del muelle
$n$	Tamaño de la muestra
$\nu$	Coeficiente de Poison
$P_b$	Presión de la bola de bruñido sobre la superficie
$p$	Carga aplicada durante la indentación Vickers
$q$	Número de piezoeléctricos en el módulo vibratorio
$r_i$	Radio interior de la roseta de galgas extensiométricas
$r_o$	Radio exterior de la roseta de galgas extensiométricas
$S_a$	Altura media del perfil (aritmética)
$S_{ku}$	Curtosis del perfil
$S_q$	Altura media del perfil (mínimos cuadrados)
$S_{sk}$	Oblicuidad del perfil
$S_{td}$	Dirección de la fibra principal del perfil
$t_{\alpha, n-1}$	Estadístico de t-student
$\sigma_{11}$	Tensión principal en la dirección 1

$\sigma_{22}$	Tensión principal en la dirección 2
$\sigma^{VM}$	Tensión equivalente de Von Mises
$V$	Voltaje del campo eléctrico de excitación ultrasónica
//	Pasadas de bruído paralelas entre sí
/_	Pasadas de bruído perpendiculares entre sí

## Unidades

°	Grado
€	Euro
GPa	Gigapascal
gf	Gramo fuerza
g/cm <sup>3</sup>	Gramo por centímetro cúbico
Hz	Hertzio
h	Hora
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
MPa	Megapascal
m	Metro
m/min	Metro por minuto
mm/min	Milímetro por minuto
μm	Micrómetro
N	Newton
nm	Nanómetro
rpm	Revolución por minuto
s	Segundo
Ω	Ohmio

# 1. Introducción

El presente capítulo del proyecto se centra en la exposición de las razones por las cuales se justifica el desarrollo de este estudio, así como la motivación por un tema tan innovador y a la vez desconocido. También se expone el experimento que se va a llevar a cabo, así como los objetivos que se persiguen con este estudio.

## 1.1. Motivación y justificación del proyecto

En la actualidad existe una constante preocupación por la mejora de las cualidades de infinitud de elementos mecánicos constituidos por materiales muy diversos con el principal objetivo de optimizar el funcionamiento de dichos componentes, así como alargar su vida útil. Muchas son las necesidades que surgen en distintos campos de aplicación, donde el principal objetivo del diseño se centra en la resistencia de los componentes frente a solicitaciones que se consideran de alto riesgo.

En el campo de la industria actual se hace hincapié constantemente en el diseño y producción de piezas con acabados superficiales de alta calidad, con el fin de mejorar su resistencia a fatiga y conseguir un coeficiente de fricción reducido, minimizando de esta forma el desgaste de los componentes por fricción y, consecuentemente, alargando su vida útil.

La gran cantidad de procesos de fabricación dirigidos a la mejora de la calidad superficial en componentes mecánicos (como lo es el bruñido) inducen la aparición de tensiones residuales en los materiales además de otros efectos como cambios en el perfil de durezas o rugosidad. Dichas tensiones se caracterizan por actuar sobre el material cuando sobre este no se aplican solicitaciones o cargas externas. Otras causas que pueden provocar la aparición de tensiones residuales son el montaje o la manipulación de las piezas, entre otras.

Las tensiones residuales pueden producir efectos beneficiosos o perjudiciales en los componentes industriales dependiendo, entre otros factores, de la magnitud y distribución de dichas tensiones en comparación con aquellas que producen las cargas externas. No obstante, por lo general, suelen provocar consecuencias negativas siendo el principal motivo de la aparición de grietas por fatiga y, en consecuencia, llegando a provocar el fallo. De esta forma, resulta de vital importancia la medición de este tipo de tensiones considerado un factor clave en el proceso de diseño.



El proceso de caracterización de las tensiones residuales resulta complejo ya que la medición de tensiones mediante sensores requiere una relajación de los esfuerzos una vez instalados, por lo que la mayor parte de técnicas utilizadas provocan la destrucción de la pieza. Otras técnicas que no requieren aliviar tensiones presentan numerosas limitaciones como la complejidad del equipo utilizado y la imposibilidad de medir en capas más profundas, como la difracción de rayos X.

En el campo de la medición de tensiones residuales el método del taladro incremental (*incremental hole drilling, IHD*) se postula como un ensayo semidestructivo que aporta numerosos beneficios frente a otras técnicas, por lo que resulta interesante el estudio de la aplicación de esta técnica para estos tipos de experimentación. Por este motivo, en este trabajo se presenta una aplicación del proceso de medida para la caracterización de los resultados del bruñido con bola asistido con vibraciones, tema no tratado en la bibliografía científica hasta el momento.

## 1.2 Objeto del proyecto

El principal objeto del presente proyecto es la caracterización de las tensiones residuales en superficies metálicas tras la aplicación del proceso de bruñido asistido por vibraciones (BAV) mediante el método del IHD, además de la determinación de otras características superficiales como la rugosidad y la dureza.

Para tal efecto, se concretan los siguientes objetivos en los que se basará la presente experimentación:

- Analizar los efectos del BAV en el cambio de la topología superficial de dos materiales, acero AISI1038 y aluminio AA2017-T4.
- Analizar los efectos del BAV en capas subsuperficiales del material en términos de endurecimiento residual, y en capas más profundas en términos de tensiones residuales.
- Realizar una comparativa con los efectos producidos en las probetas variando la dirección de las distintas pasadas de bruñido y con el proceso de bruñido convencional.

## 1.3 Alcance del proyecto

Con el fin de cumplir con el objetivo marcado en el presente trabajo se definen una serie de tareas a realizar que marcarán el alcance de la investigación:

- Preparar las probetas para el estudio. Para la preparación del experimento se mecanizarán las probetas de acero AISI1038 y aluminio AA2017-T4 que se van a utilizar mediante pasadas sucesivas de fresado hemisférico para obtener topologías periódicas de diferentes escalas.
- Bruñir la superficie de las probetas, fijando los parámetros del proceso según estudios previos.
- Medir tensiones residuales inducidas en las probetas, además de otras características como la rugosidad o la dureza.
- Analizar conclusiones y formular recomendaciones en base a dichas conclusiones.

## 1.4 Requerimientos

El trabajo presentado se basa en el estudio de una de las técnicas de acabado superficial por deformación metálica más innovadoras en la industria actual. La complejidad de esta técnica, así como los efectos producidos tras su aplicación, requieren una serie de conocimientos previos.

A continuación, se establecen los requerimientos previos a la realización del presente estudio:

- Conocer la técnica del bruñido como un proceso de deformación metálica, los efectos producidos tras su aplicación y los parámetros básicos que influyen en el proceso.
- Conocer las técnicas de asistencia en los procesos de fabricación y, en especial, la asistencia mediante vibraciones en el proceso de bruñido con bola.
- Conocer las principales características que definen la superficie de un material, como la rugosidad y la dureza, además de las principales técnicas para su medición.
- Conocer el concepto de tensiones residuales en elementos mecánicos y los principales efectos que éstas inducen.
- Conocer las técnicas de medición de tensiones residuales en materiales metálicos y, más en concreto, la técnica IHD.
- Revisar la experimentación realizada en el mismo campo con el fin de establecer los parámetros óptimos en el proceso.

## **2. Estado del arte**

En este capítulo se plasman las principales investigaciones realizadas en torno al tema tratado en este estudio. Mediante una extensa búsqueda bibliográfica se detallan las principales conclusiones extraídas por diferentes investigadores, a partir de las cuales se fijará el punto de partida para el proyecto desarrollado.

En una primera parte se realiza una breve introducción del proceso de bruñido como técnica de acabado superficial y, en adición, los principales parámetros que determinan el resultado obtenido tras la aplicación de esta técnica. Además, se introduce el concepto de asistencia mediante vibraciones como técnica de mejora del proceso.

Ya en una segunda parte se detallan los principales efectos que introduce la aplicación de esta técnica tras un proceso de mecanizado, postulándose como alternativa a los procesos tradicionales de acabado.

### **2.1 Operación de bruñido**

De forma general, la técnica del bruñido se define como un proceso de acabado por deformación plástica del material producido por la acción de un indentador que transmite una fuerza controlada sobre la superficie tratada. Introduciendo un movimiento de avance en la herramienta se consigue aplicar el proceso en la totalidad de la superficie del material, consiguiendo un acabado que difiere sustancialmente del obtenido tras el mecanizado.

La tipología de superficies en las cuales se puede aplicar la técnica del bruñido se ve reducida a superficies sencillas si se compara con otras técnicas de acabado superficial como el granallado o el pulido, por citar algunas [29]. Esto se debe a que la geometría de la herramienta utilizada en el proceso limita la flexibilidad del proceso. No obstante, los beneficios que ofrece esta novedosa técnica de acabado superficial son numerosos frente a otros procesos, tal y como comenta Gómez-Gras en su tesis (2015) [10]:

- Se trata de una operación de acabado en el que no se produce arranque de viruta, por lo que no se modifican las cotas nominales, evitando de esta forma la necesidad de sobreespesores de material durante el mecanizado y, en consecuencia, reduciendo el coste del proceso.

- Se puede automatizar por completo el proceso en la misma máquina donde se ha realizado el mecanizado de la pieza, reduciendo los tiempos de preparación y, en consecuencia, el coste total del proceso.
- Genera un triple efecto sobre las superficies tratadas. Por una parte, modifica tanto el perfil de rugosidad como el de durezas, mejorando el acabado de las superficies. Por otra parte, induce tensiones residuales compresivas en el material, mejorando la vida a fatiga del material en cuestión.

Además de los numerosos beneficios que aporta esta técnica se trata de un proceso versátil en el cual se pueden variar distintos parámetros con el fin de llegar a resultados que difieren en gran medida, en función de cuál sea la característica del material sobre la que se quiera incidir. Llegados a este punto, resulta interesante explicar cuáles son los principales parámetros a fijar durante el proceso de bruñido, con el fin efecto de obtener la combinación para el experimento que ofrezca un mejor resultado. En la figura 1 se muestra una esquematización de la técnica del bruñido aplicada sobre una superficie plana:

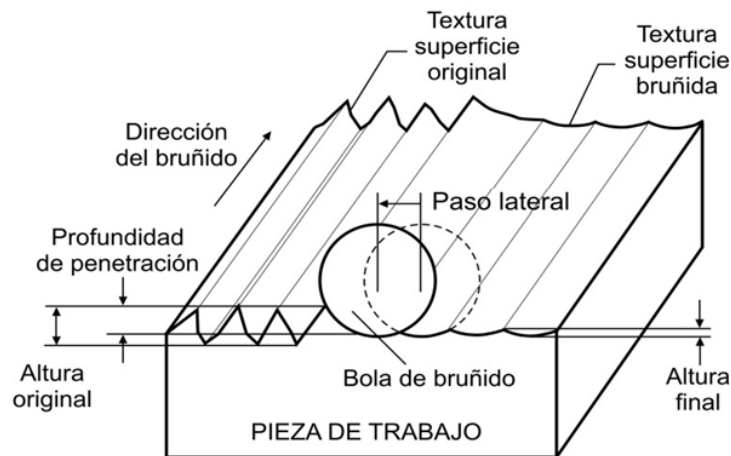


Figura 1. Esquemmatización del proceso de bruñido con bola [5]

Como se ha comentado previamente, la técnica del bruñido con bola se basa en la aplicación de una fuerza que se transmite a un indentador para deformar plásticamente la superficie del material. La forma con la que se transmite la fuerza sobre la pieza a bruñir varía en función de la herramienta utilizada, entre las cuales destacan las que emplean presión hidrostática o las que transmiten fuerza por la compresión de un muelle, entre otras [8]. Para el presente estudio, y puesto que la herramienta a utilizar transmite la fuerza mediante un muelle a compresión (TFMC), la fuerza de bruñido  $F_p$  se regirá por la Ley de Hooke:

$$F_p = k \cdot \Delta z$$

Donde la  $k$  se corresponde con la constante elástica del muelle con el que se equipa la herramienta y  $\Delta z$  es el desplazamiento vertical aplicado sobre ésta. Por lo tanto, comprimiendo el módulo donde se ubica el muelle mediante la bajada de la herramienta contra la superficie del material se obtiene una transmisión de fuerza que variará linealmente en función del desplazamiento en profundidad que se aplique sobre la herramienta. El valor de la fuerza aplicada sobre la pieza incide directamente sobre el resultado final y, en especial, sobre la rugosidad y dureza debido a la deformación plástica que experimenta el material. Tal y como comenta A. Mahmood (1997) [25] una mínima variación de la fuerza de bruñido genera cambios sustanciales en cuanto a rugosidad y dureza se refiere.

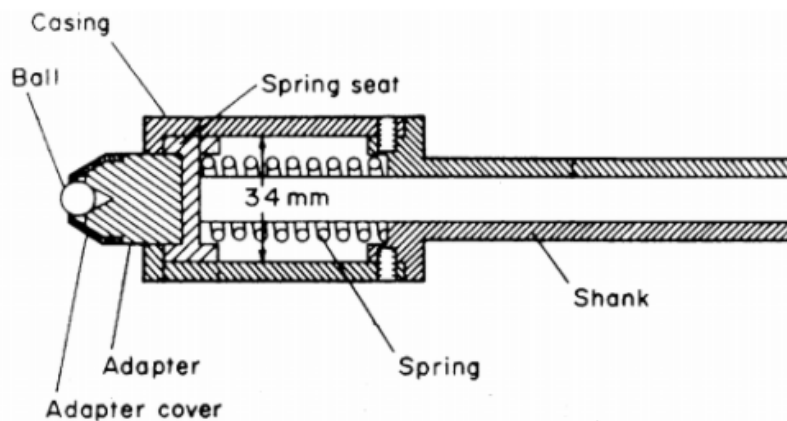


Figura 2. Herramienta de bruñido estándar regulada por muelle [14]

Aunque hasta el momento solo se ha hablado sobre el proceso de bruñido con bola esta técnica también puede desarrollarse mediante un indentador en forma de rodillo [4]. Por lo tanto, la forma del indentador y su dimensión, así como la máquina sobre la cual se aplica el proceso, introducen una nueva variable a fijar en la técnica del bruñido, dando lugar a distintas configuraciones con las que se puede tratar una amplia variedad de superficies. La forma que presenta el indentador y sus dimensiones vendrán determinadas por la morfología de la superficie que se deba bruñir. No obstante, la presión ejercida por la herramienta sobre la superficie varía en función de la forma del indentador (aplicando una misma fuerza) debido al tipo de contacto establecido:

$$P_b = \frac{F_p}{A}$$

Donde  $P_b$  se corresponde con la presión ejercida sobre la superficie del material, directamente proporcional a la fuerza de bruñido  $F_p$  e inversamente proporcional al área de contacto entre indentador y material  $A$ , siendo esta circular para el caso del bruñido con bola y rectangular para el caso del bruñido con rodillo (debido a la deformación experimentada durante la aplicación de la técnica).

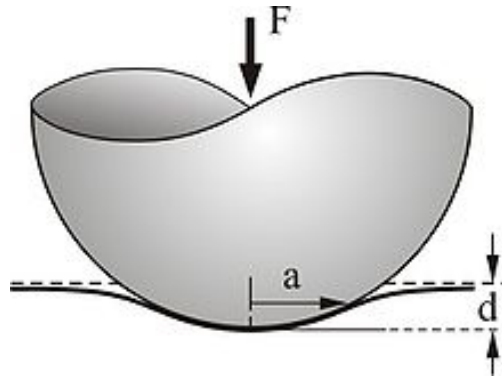


Figura 3. Detalle del contacto entre la bola de bruñido y la superficie tratada [12]

Además del tipo de indentador, la flexibilidad del proceso en cuanto a la máquina sobre la cual se ejecute el proceso permite cubrir un amplio abanico de superficies que difieren en morfología. Tras la búsqueda bibliográfica se observa que esta técnica se ha aplicado en torno para el bruñido de superficies de revolución y fresadora para el resto, tal y como se muestra en la figura:

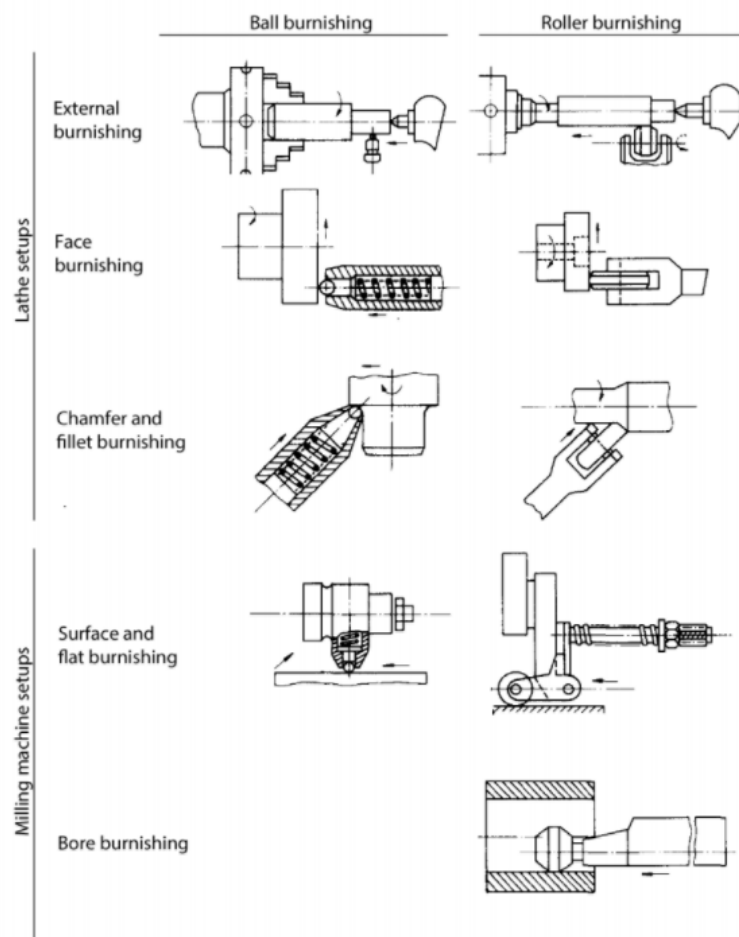


Figura 4. Configuraciones para el proceso de bruñido según la máquina empleada y el tipo de indentador [28]

Por lo que al tiempo del proceso se refiere viene determinado por dos parámetros: el movimiento de avance de la herramienta  $f$  y el paso lateral  $a_p$ . El avance se define como la velocidad lineal a la cual se mueve la herramienta a lo largo de la dirección de bruñido, mientras que el paso lateral se corresponde con la separación existente entre dos pasadas adyacentes. La combinación de ambos parámetros permite cubrir la totalidad de la superficie a tratar, dando lugar a unos resultados que difieren en gran medida en función del valor de ambas variables [31]. Además, el número de pasadas  $n$  de bruñido aplicadas sobre una misma superficie también determina el tiempo del proceso. No obstante, tal y como comentan H. Hamadache et al. (2006) [11] un mayor número de pasadas influye sobre el resultado final y, en especial, sobre el incremento en valores de dureza debido a la deformación plástica experimentada por el material.

Cabe decir que la configuración del avance y el paso lateral varía en función de la máquina sobre la que se desarrolla el proceso. De esta forma, para la aplicación del bruñido en el torno el avance de la herramienta vendrá determinado por la velocidad de rotación del cabezal que sujeta la pieza a tratar, mientras que el paso lateral se fija con el valor del avance de la herramienta; para la aplicación del bruñido en la fresadora el avance viene determinado directamente por el movimiento de la herramienta en la dirección del bruñido, mientras que el paso lateral se define como el avance en dirección perpendicular al bruñido.

Finalmente, la dirección de las distintas pasadas de bruñido también incide sobre el resultado. Por lo tanto, se pueden realizar todas las pasadas en una misma dirección, paralelas entre ellas, o bien se pueden alternar pasadas perpendiculares entre sí.



*Figura 5. Inspección visual del efecto producido tras la aplicación del bruñido*

## **2.2 Asistencia por vibraciones**

Hoy en día una de las principales preocupaciones existentes en cuanto a la aplicación de técnicas de acabado es la optimización de los resultados obtenidos. Si bien una combinación de parámetros óptima permite obtener resultados favorables, el proceso podría llegar a mejorarse. En este ámbito toma vital importancia la asistencia sobre las técnicas de fabricación y, en especial, de acabado superficial.

Asistir a una técnica de fabricación consiste en introducir una fuente externa al proceso que contribuya a una simplificación u optimización de dicho proceso. Dicha asistencia puede variar en función de cual sea la fuente utilizada. Son numerosos los ejemplos que existen en el mercado, entre los cuales destacan la asistencia por láser, ultrasonidos o vibraciones, entre otros. Para la realización del presente estudio resulta de vital importancia analizar la aplicación de vibraciones como un método de asistencia al proceso de bruñido, basándose en el fenómeno de la acustoplasticidad.

Según el efecto acustoplástico, cuando se acompaña con una vibración a una fuerza que deforma plásticamente un material disminuye notablemente su límite elástico, debido a que las dislocaciones internas se propagan a través de la red cristalina con mayor facilidad, disminuyendo la tensión necesaria para conseguir deformación plástica residual [36]. En consecuencia, la fuerza de bruñido aplicada durante este proceso puede verse reducida en comparación al proceso convencional, obteniendo un mismo resultado sobre la pieza tratada, debido a que esta técnica se basa en la deformación plástica que se produce sobre el material. De esta forma, la asistencia mediante vibraciones cobra una gran importancia en cuanto a la reducción de las fuerzas de bruñido o en el tratamiento de materiales con límites de elasticidad muy elevados, en los cuales los valores de fuerza necesarios dificultarían el proceso en gran medida.

Además del ablandamiento que experimenta el proceso cuando se somete a vibraciones, el efecto acustoplástico también es conocido por el endurecimiento residual que introduce. Por lo tanto, este fenómeno explica la importancia de asistir al proceso de bruñido mediante esta técnica.



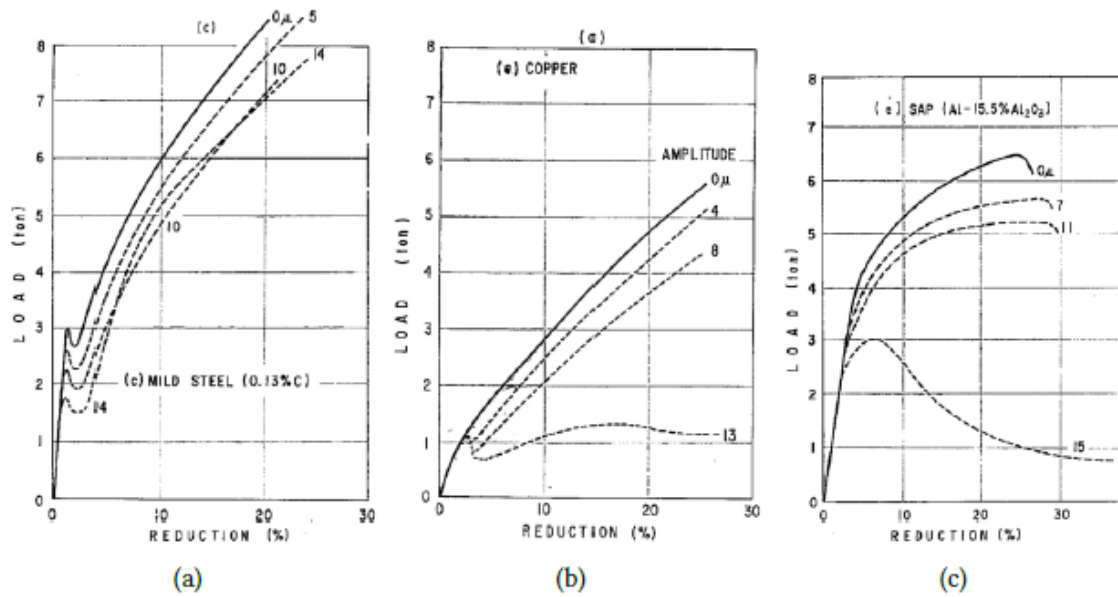


Figura 6. Reducción de la fuerza necesaria para la deformación de distintos materiales debido a la introducción de vibraciones; a) Acero. b) Cobre. c) Aleación de aluminio [21]

Aunque la asistencia por vibraciones al proceso de bruñido aporta numerosos beneficios respecto al proceso convencional son pocos los estudios realizados en este campo. De entre los estudios referenciados destaca el desarrollado por Gómez-Gras en su tesis (2015) [10], quien ideó una herramienta de bruñido capaz de inducir vibraciones a partir de la flexión de dos placas delgadas. Dicha herramienta incorpora un módulo central equipado con una bobina que genera un campo magnético cuando se excita a una determinada frecuencia de 2 kHz (frecuencia media). La fuerza generada por el campo provoca una atracción cíclica entre las placas de la herramienta, haciéndolas vibrar a la frecuencia que determina el campo. De esta forma, y controlando la excitación a la que se somete la herramienta, se puede controlar en todo momento la componente de fuerza introducida por la vibración de las placas.

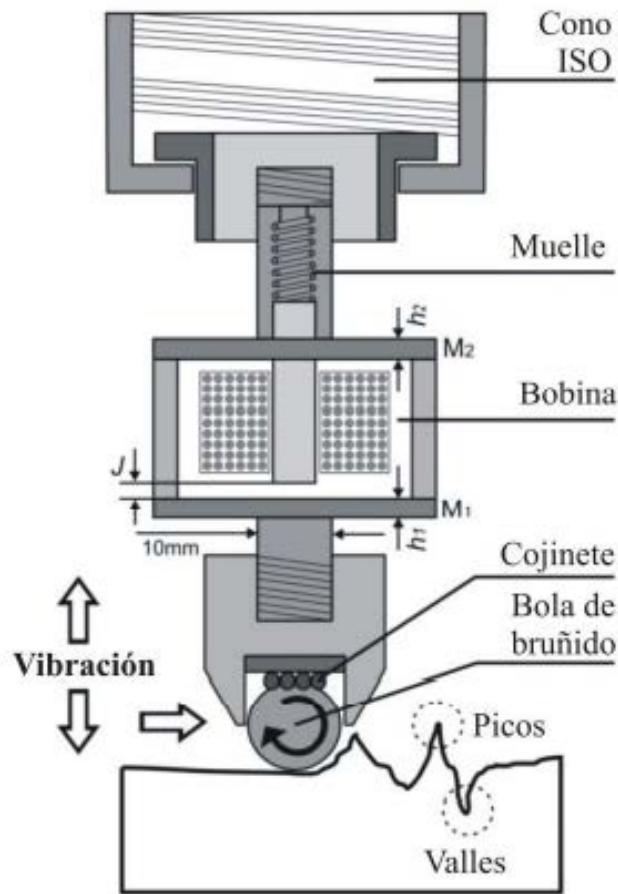


Figura 7. Esquemmatización de la herramienta ideada por Gómez-Gras [10]

Por otra parte, existe otra herramienta de bruñido asistida por vibraciones que se encuentra operativa en el mercado. La idea fue patentada por R. Jerez-Mesa y caracterizada en su tesis (2018) [22]. La herramienta diseñada incorpora un módulo de vibración compuesto por un conjunto de transductores piezoeléctricos superpuestos que se deforman cíclicamente cuando se excitan mediante un campo eléctrico, introduciendo un movimiento vibratorio en el módulo de bruñido de la herramienta.

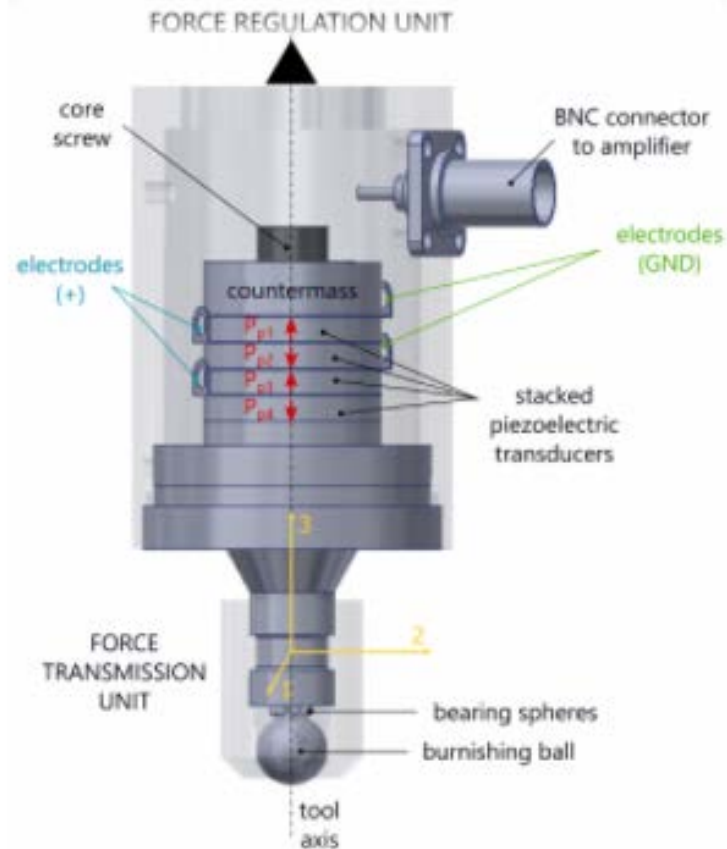


Figura 8. Módulo vibratorio de la herramienta de bruñido patentada por Jerez-Mesa [22]

Por tanto, el efecto que la asistencia con vibraciones produce sobre las superficies bruñidas depende directamente del valor de fuerza introducido por la vibración experimentada por la herramienta. Tal y como comentan varios autores, este efecto sería beneficioso en cuanto a características superficiales se refiere si se aplica con una óptima combinación de parámetros.

## 2.3 Efectos tras la aplicación del bruñido

La cuantificación de las principales características superficiales y, en especial, de las tensiones residuales tras la aplicación de la técnica del bruñido justifica el objeto del presente proyecto. Dicha técnica únicamente introduce cambios en las capas más externas de la pieza, por lo que los resultados inducidos por el bruñido deberán cuantificarse a partir del estudio de los parámetros superficiales y próximos a la superficie. Llegados a este punto resulta de vital importancia referenciar cuáles son los principales estudios relacionados con la cuantificación de dichas características y cuáles son los efectos que la técnica del bruñido induce sobre su magnitud.

Muchos son los autores que han experimentado con esta técnica, con el fin de caracterizar el proceso en función de las propiedades del material a tratar. No obstante, la mayoría de los estudios referencian la aplicación de la técnica en la máquina torno, mientras que el presente estudio se caracteriza por el bruñido de superficies planas y, en consecuencia, se aplica el proceso en la máquina fresadora. No obstante, existen referencias bibliográficas suficientes a partir de las cuales se puede fijar una combinación de parámetros adecuada para el experimento [22].

La siguiente tabla recoge los principales estudios relacionados con la aplicación de la técnica del bruñido sobre superficies de aluminio y acero, donde se aplica TPMC:

<b>Referencia bibliográfica</b>	<b>Material</b>	<b>Año de publicación</b>
A. M. Hassan et al. [16, 17]	Aluminio puro	1996
A. M. Hassan [18]	Aluminio puro	1997
A. M. Hassan et al. [19]	Aleación Al-Cu	2000
A. M. Hassan et al. [15]	Aluminio puro	2000
M. Némat, A. Lyons [30]	Aluminio AA6463-E	2000
F. J. Shiou, C. H. Chen [34]	Acero PDS5	2003
W. Bouzid et al. [2]	Acero AISI 1042	2004
H. Hamadache et al. [12]	Acero Rb40	2006
F. Gharbi et al. [9]	Acero AISI 1010	2008
A. Sagbas [32]	Aluminio AA 7178	2088
G. Majzoobi et al. [26]	Aluminio 7075-T6	2009
F. J. Shiou, C. Chuang [35]	Acero PDS5	2010
A. Rodriguez et al. [31]	Acero 41Cr4	2012

Tabla 1. Estudios relacionados con el bruñido mediante TPMC

### ***2.3.1 Rugosidad y textura superficial***

Como ya se ha comentado con anterioridad, la aplicación de una técnica de mecanizado introduce irregularidades sobre la superficie, ya sea a escala macroscópica alterando la planitud o curvatura de la superficie o a escala microscópica, introduciendo defectos como crestas o perfiles de rugosidad elevados para la aplicación prevista. La eliminación de dichas irregularidades ha sido durante años una de las principales preocupaciones en el campo industrial, ya que son determinantes por fallos debido al desgaste por abrasión entre uniones de piezas con movimiento relativo entre ellas, o el fallo debido a la fatiga del material, entre otros.

La eliminación de las irregularidades introducidas por los diferentes procesos de mecanizado se consigue mediante las técnicas de acabado anteriormente descritas. Entre ellas, el bruñido se postula como una técnica que introduce resultados notables en cuanto a rugosidad se refiere, permitiendo modificar el perfil de rugosidad sin modificar las cotas nominales de la pieza ya que no se produce arranque de material, sino que se deforma plásticamente. De esta forma, una correcta combinación de parámetros permite reducir el perfil de rugosidad hasta valores por encima del 80% respecto al original.

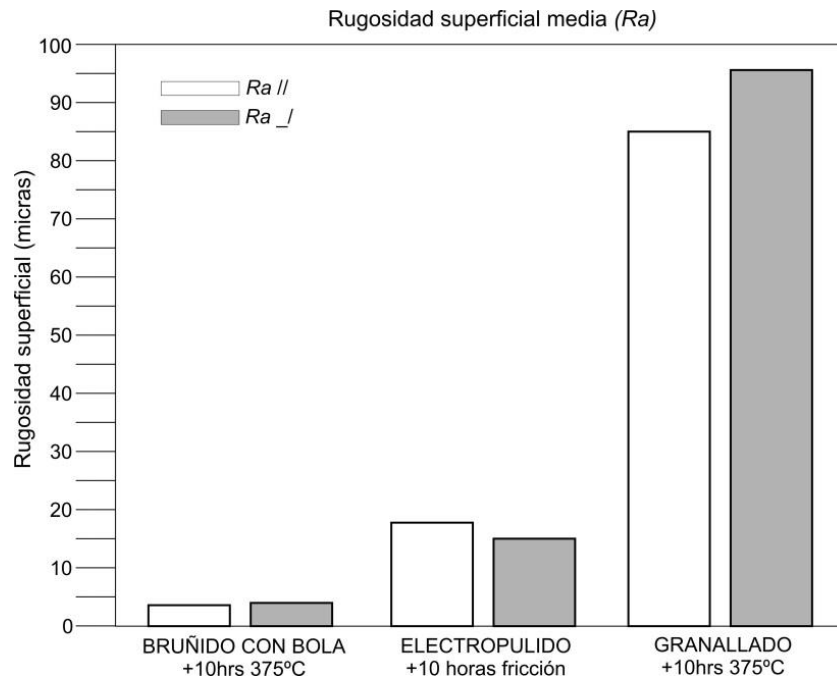


Figura 9. Comparación de la rugosidad obtenida tras diferentes técnicas de acabado [33]

A grandes rasgos, el perfil de rugosidad que presenta una superficie se define como la diferencia de cota a nivel microscópico entre distintos puntos del material, de forma que se puede distinguir entre los puntos de máxima cota o crestas y los puntos de mínima cota o valles. La deformación plástica experimentada por el material permite un desplazamiento de material desde las cotas más altas a las mínimas, consiguiendo un aplanamiento de la superficie.

Son numerosos los parámetros que definen el perfil de rugosidad superficial de una pieza. No obstante, entre ellos destaca el valor de rugosidad media con el que se obtiene un indicador del perfil medio que presenta la totalidad de la superficie. Más adelante se detallan cuáles son los principales parámetros que definen el perfil de rugosidad de los componentes mecánicos.

### 2.3.2 Perfil de durezas

El perfil de durezas de un material puede verse modificado por distintos procesos, ya sea por el cambio de fase experimentado por el material o por la aplicación de un gradiente térmico. El proceso de bruñido se caracteriza por introducir cambios sustanciales en el perfil de durezas a nivel superficial o en capas próximas a la superficie, debido a la deformación plástica que experimenta la pieza.

La deformación plástica durante la operación de bruñido se caracteriza por desarrollarse en frío, lo que produce un endurecimiento del material debido a la propagación de las dislocaciones. En consecuencia, la resistencia ofrecida por el material frente a futuras dislocaciones se verá aumentada, resultando en un endurecimiento del material.

Como se ha comentado anteriormente, la magnitud con la que el bruñido afecta la dureza de un material está estrechamente ligada con la fuerza con la que se desarrolla el proceso. Un incremento en la fuerza de bruñido resulta en un incremento de los valores de dureza a nivel superficial [23]. La cuantificación de los valores de dureza se detalla más adelante.

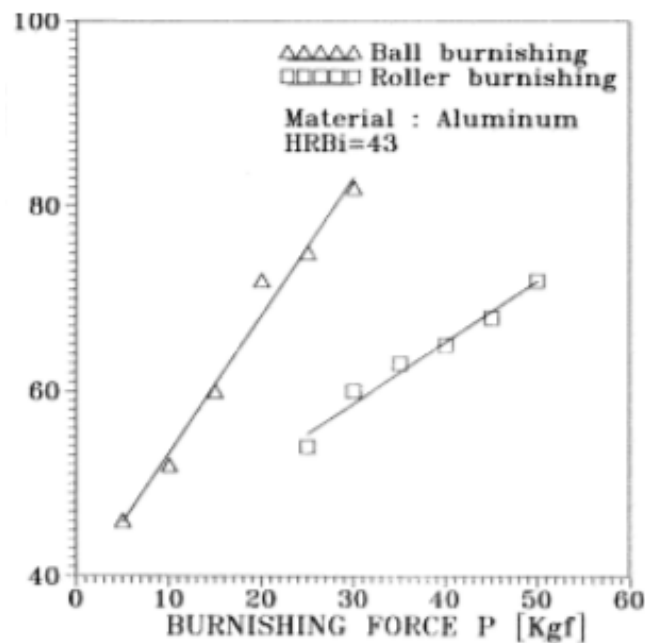


Figura 10. Incremento del valor de dureza en aluminio para diferentes valores de fuerza de bruñido [25]

### ***2.3.3 Tensiones residuales***

La medición de las tensiones residuales tras la aplicación de la técnica del bruñido constituye el objeto principal del presente proyecto. De este modo, se prestará especial atención al este apartado con el fin referenciar las principales técnicas de medición de dichas tensiones y, en especial, de la novedosa técnica del IHD.

#### **2.3.3.1 Tipos de tensiones residuales**

A lo largo de la historia son numerosos los estudios realizados en torno a la caracterización de las tensiones residuales presentes en los materiales. A nivel industrial, dichas tensiones son una de las principales causas de fallos en los componentes mecánicos, por lo que existe un gran interés en la determinación y cuantificación de éstas.

A nivel general, las tensiones residuales son aquellas que existen en el material cuando este no está sometido a sollicitaciones externas. Hoy en día no es suficiente la determinación de las tensiones en servicio, sino que muchos de los casos documentados en los que se ha producido fallo ocurren con la presencia de este tipo de esfuerzos.

La aparición de tensiones residuales es debida, en la mayor parte de casos, por causas térmicas o mecánicas –deformaciones inelásticas inducidas sobre el material. Por poner un ejemplo, en el proceso de soldadura se inducen tensiones residuales en los materiales soldados debido a un enfriamiento gradual de la pieza [1]. Entre las causas mecánicas más comunes destacan los procesos de deformación plástica de los materiales, como lo es el bruñido.

Las tensiones residuales existentes en los materiales son necesarias para mantener el equilibrio del sólido con el entorno. Aunque en la mayoría de casos la presencia de tensiones residuales resulta perjudicial para el componente mecánico pudiendo llegar a provocar el fallo, en otros la existencia de este tipo de tensiones sería beneficioso. Es el caso de las tensiones residuales compresivas inducidas tras la aplicación del bruñido, estrechamente ligadas con la vida a fatiga de un material. De este modo, la aparición de dichas tensiones permite una mejora en la vida del material sometido a fatiga por esfuerzos cíclicos [13]. Dichas tensiones se cuantifican en este estudio, tal y como se expone más adelante.

Para entender cómo se comportan las tensiones residuales se debe estudiar el material a nivel de los granos que lo forman, donde estos esfuerzos toman lugar. De este modo se puede distinguir entre las macrotensiones y las microtensiones en función

de la escala a la cual se producen. Mientras que las primeras afectan a varios granos del material, las últimas se producen a nivel atómico o individualmente en cada grano. De forma más específica, se pueden distinguir tres tipos de tensiones residuales:

- Tensiones residuales de tipo I. En este grupo se incluyen las macro tensiones, las cuales se producen por afectar gran parte del material debido a que se producen sobre varios granos.
- Tensiones residuales de tipo II. Dentro de este grupo se incluyen aquellos esfuerzos que afectan a cada grano individualmente, es decir, micro tensiones que se producen a nivel microscópico.
- Tensiones residuales de tipo III. Se clasifican dentro de este grupo aquellas micro tensiones que se producen a nivel submicroscópico, es decir, afectan el material a nivel atómico.

En la figura 11 se muestran los principales tipos de tensiones residuales, así como las causas que producen su aparición.

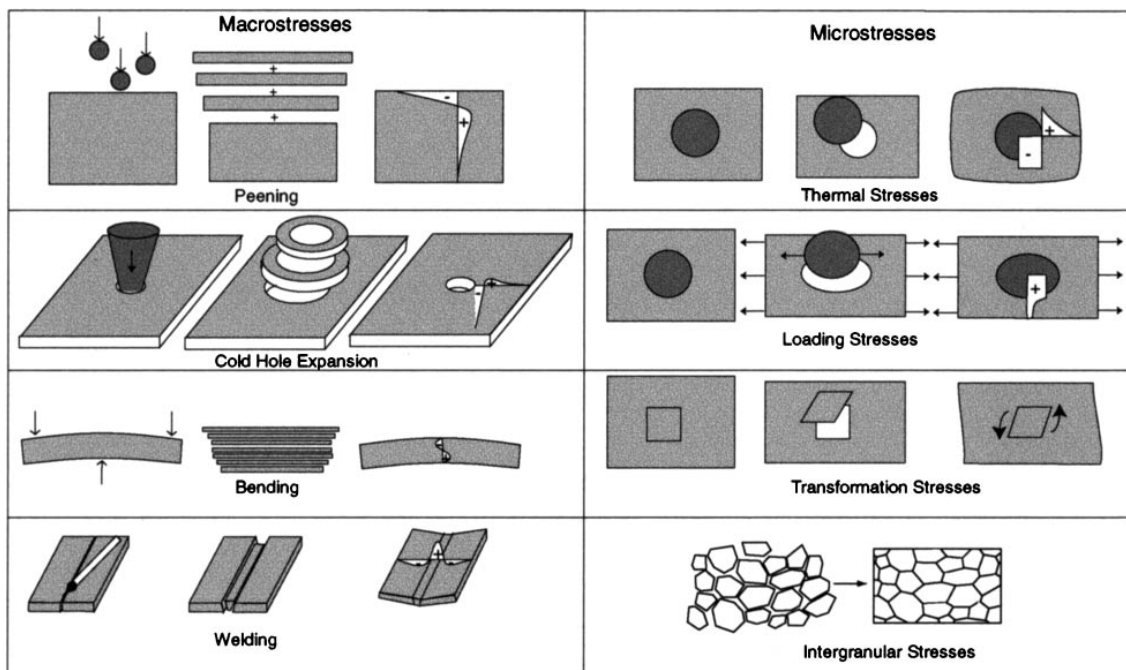


Figura 11. Tipos de tensiones residuales y principales causas de su aparición [39]

### 2.3.3.2 Métodos para la cuantificación de tensiones residuales

Como ya se ha comentado con anterioridad, el persistente interés en la determinación de las tensiones residuales recae en los efectos producidos tras su aparición. La inducción controlada de dichos esfuerzos ofrece grandes beneficios en el campo industrial, entre los cuales destaca la mejora de la vida a fatiga de los componentes mecánicos y, en consecuencia, el aumento en el tiempo de vida de las piezas.



Las técnicas empleadas en la medición de tensiones residuales se basan en aliviar parte de los esfuerzos, de forma que estos puedan ser percibidos y cuantificados posteriormente.

La clasificación de los métodos que se emplean en la medición de tensiones residuales se basa en la naturaleza de la técnica, así como la interacción con el material estudiado. Según el último criterio, se puede distinguir entre tres tipos de medición:

- **Ensayos destructivos.** Las técnicas de medición destructivas se caracterizan por alterar completamente la estructura del material de estudio, de forma que la pieza queda inoperativa por la pérdida de gran parte del material. Un ejemplo de este tipo de técnicas es el introducido por Garcia-Granada [6, 7] en el cual se instalan galgas de medición sobre una cara de la pieza, mientras que se elimina el material por la cara opuesta de este, aliviando las tensiones residuales de forma que puedan ser percibidas por los sensores.
- **Ensayos no destructivos.** Este tipo de ensayos se caracterizan por no interferir en la correcta funcionalidad de la pieza, ya que no modifican su integridad. Son técnicas basadas en difracciones, entre las cuales destacan la difracción de neutrones [24] o la difracción por rayos X [37]. No obstante, la profundidad a la cual este tipo de tensiones puede cuantificarse mediante esta técnica se ve muy reducida.
- **Ensayos semidestructivos.** Las técnicas de medición semidestructivas se caracterizan por eliminar material de la pieza de forma local. De este modo la pieza no se altera en gran medida, por lo que su funcionalidad no se ve alterada. Entre este tipo de ensayos destaca la innovadora técnica del taladro incremental, en la cual se va a incidir más adelante por ser el método utilizado en el experimento realizado.

Llegados a este punto resulta interesante abordar las principales técnicas empleadas en la determinación de las tensiones residuales presentes en los materiales, detallando los principales beneficios y limitaciones. Dichas técnicas se resumen en el trabajo de P.J. Withers y H.K.D.H. Bhadeshia (2001) [39], las cuales se citan en la siguiente tabla:

<i><b>Técnica</b></i>	<i><b>Aplicación</b></i>
<b>Curvatura</b>	Determinación de tensiones residuales entre capas del material
<b>Taladro incremental</b>	Cálculo de tensiones residuales en pequeñas profundidades por relajación de tensiones tras taladrar

<b>Difracción</b>	Cálculo de tensiones a partir de cambios en el espaciamiento de los granos del material mediante la incidencia de haces de luz focalizados
<b>Ultrasonidos</b>	Medida de tensiones residuales a partir del cambio en la velocidad ultrasónica
<b>Efectos piezospectroscópicos</b>	Variación en la luminiscencia fluorescente frente a tensiones
<b>Técnicas electromagnéticas</b>	Alteración de la orientación de las tensiones en materiales con propiedades magnéticas
<b>Técnicas fotoelásticas</b>	Variación en la velocidad de la luz frente a tensiones
<b>Técnicas termoelásticas</b>	Variación de las tensiones residuales a partir de la aplicación de gradientes térmicos

Tabla 2. Resumen de las principales técnicas para la medición de tensiones residuales

### **Método del taladro incremental**

En última estancia se aborda la técnica IHD por ser el método utilizado en el trabajo. Por tanto, el presente subcapítulo indica minuciosamente la metodología a seguir para la correcta implementación de esta técnica, así como los beneficios y limitaciones que ésta ofrece frente a otros métodos de medición de tensiones residuales.

Como se ha comentado en capítulos previos, la medición de tensiones residuales mediante sensores requiere que los esfuerzos a los que está sometido el material sean aliviados en cierta medida con el fin de captar variaciones en la distribución de tensiones. Dichos cambios en el estado tensional del material sensibles de ser percibidos y cuantificados mediante la instalación de sensores próximos a la zona afectada. Para el caso que ocupa se utilizan galgas extensiométricas como sensor, tal y como se detallará más adelante. Basándose en el principio piezoresistivo, una galga extensiométrica tiene la capacidad de variar su resistencia cuando se somete a deformaciones, debido al cambio de longitud que experimentan los conductores [20]. De esta forma, se puede establecer la relación existente entre el cambio resistivo de la galga y la deformación que experimenta el material.

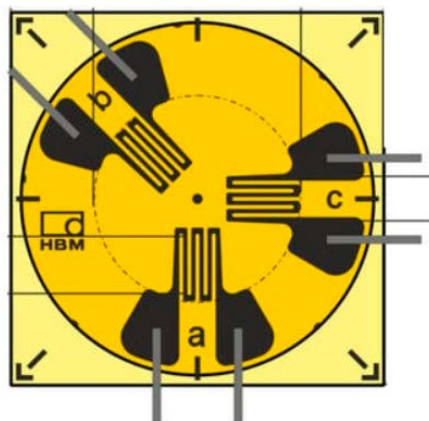
El método del taladro incremental se presenta como una técnica de medición semidestructiva. De este modo, el proceso se basa en la implementación de un pequeño agujero concéntrico a una roseta de galgas extensiométricas previamente instalada en la zona de medición. El diámetro del agujero, así como la pequeña profundidad a la cual

se realiza el taladro no interfieren en el funcionamiento normal de la pieza estudiada, y de ahí la caracterización del proceso como una técnica semidestructiva.

La técnica se basa en el principio introducido por Mathar (1934) [27], quien postuló que cualquier eje perpendicular a una superficie es necesariamente un eje principal donde los esfuerzos cortantes y normales son nulos, por lo que la eliminación de dichos esfuerzos provoca cambios en zonas inmediatamente próximas. De esta forma, la introducción de un taladro perpendicular a la superficie de estudio introduce variaciones en el estado tensional de las regiones próximas. Como se observa en capítulos posteriores, el agujero se mecaniza en etapas incrementales a pequeña profundidad mediante código de control numérico.

En la mayoría de los casos, el estado tensional de un material se define como biaxial, es decir, existe un par de ejes principales en los cuales las tensiones no son nulas, a diferencia de los casos particulares en que el estado tensional sigue una única dirección (estado uniaxial). Por lo tanto, la instalación de una única galga extensiométrica en la zona de medición no ofrece información suficiente para la cuantificación de tensiones residuales en el caso de estados tensionales biaxiales.

La solución adoptada por el presente método para una cuantificación exacta del estado tensional es la instalación de un conjunto de tres galgas extensiométricas en forma de roseta concéntrica a la zona de realización del taladro. Dos de las galgas que forman el conjunto se orientan en dirección de los ejes tensionales principales (perpendiculares entre ellas), mientras que una tercera galga se sitúa a un determinado ángulo respecto a dichos ejes. No obstante, la introducción de una tercera galga a  $135^\circ$  respecto del eje vertical simplifica en gran medida las expresiones para el cálculo de tensiones residuales, por lo que las rosetas de galgas extensiométricas comercializadas para tal efecto presentan esta configuración.



*Figura 12. Modelo de roseta RY comercializado por la empresa HBM para la cuantificación de tensiones residuales*

Como se puede observar en la figura 12, cada una de las galgas presenta dos terminales. De este modo, se deberá instalar el cableado adecuado que se conectará al instrumento de medición multicanal con el fin de obtener los valores sensados por las galgas.

El método IHD se define en la norma ASTM E837-08, en la cual se establecen las dimensiones del taladro y de las galgas utilizadas, así como las expresiones para la determinación del estado tensional del material a partir de los valores instrumentados por los sensores.

En resumen, el método del taladro incremental introduce las siguientes etapas:

- Instalación de la roseta de galgas extensiométricas adecuada (consultar norma ASTM E837-08) para la determinación del estado tensional del material.
- Cableado de las galgas mediante soldadura en sus terminales de medición.
- Conexión de los terminales al aparato de medición multicanal para la obtención de los valores del proceso.
- Mecanizado del taladro para la aliviación del estado tensional.
- Toma y procesamiento de datos con el fin de determinar las tensiones residuales del material experimentado.

Como se ha podido observar, el método IHD es una técnica compleja y de difícil implementación. La correcta instalación de las galgas requiere de un proceso minucioso con el fin de obtener resultados precisos y de gran validez. No obstante, se presenta como un método semidestructivo que, respecto a otras técnicas de medición de tensiones residuales, permite la determinación del estado tensional de materiales hasta una profundidad de 5 mm, además de ser una técnica relativamente económica frente a otros métodos. La aplicación del IHD ofrece numerosos beneficios en relación a otras técnicas, aun siendo un proceso novedoso en fase experimental.

De entre las investigaciones en torno al método destaca la realizada por García-Granada et. al. (2017) [8]. En ésta se detalla el proceso realizado para la medición de las tensiones residuales en acero AISI1038 y aluminio AA2017-T4 tras la operación de bruñido convencional mediante la aplicación de la técnica IHD. En el trabajo se observa el efecto producido por la técnica de bruñido sobre los materiales citados, además de validar la aplicación del método.

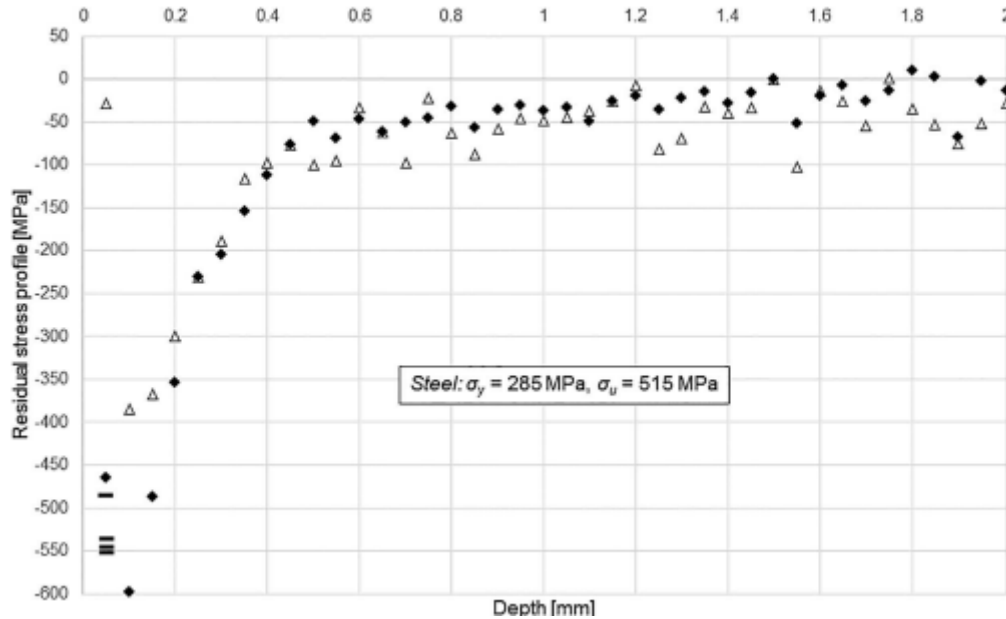


Figura 13. Resultados de tensiones residuales sobre acero AISI1038 tras el bruñido a distintas profundidades del material medidas por el método IHD [13]

## 2.4 Objetivos a partir del estado del arte

A partir de la búsqueda bibliográfica en torno al tema tratado en el proyecto se extraen las siguientes conclusiones:

- La técnica del bruñido con bola se postula como un proceso de acabado que ofrece numerosos beneficios en cuanto a rugosidad y perfil de durezas se refiere, además de introducir tensiones residuales compresivas que favorecen la vida a fatiga de los componentes mecánicos.
- La asistencia mediante vibraciones al proceso de bruñido introduce ciertas ventajas respecto del sistema convencional que permiten facilitar el proceso.
- Existen numerosas técnicas para la determinación del estado de tensiones residuales en los materiales. En función del resultado a obtener o del material a tratar se escoge la técnica más adecuada.

Por lo tanto, a partir del estado del arte descrito en el presente capítulo se postulan las siguientes hipótesis a contrastar en el estudio presentado:

- La asistencia mediante vibraciones ultrasónicas al proceso de bruñido mejora los resultados obtenidos.
- El método IHD se postula como válido para la evaluación de las tensiones residuales hasta 5 mm de profundidad.

## **3. Descripción del proceso experimental**

El presente capítulo expone los pasos realizados con el fin de cuantificar las principales características superficiales del acero AISI1038 y aluminio AA2017-T4. En primera instancia se detalla la aplicación del proceso de bruñido utilizando diferentes parámetros para analizar su influencia sobre el resultado superficial, los valores de los cuales han sido seleccionados a partir de la bibliografía consultada en torno al tema tratado, con el fin de obtener resultados óptimos. Seguidamente, se expone el procedimiento utilizado para la caracterización de las superficies en términos de tensiones residuales, dureza y topología, así como la instrumentación necesaria para tal efecto.

### **3.1 Diseño del experimento**

Como se ha comentado anteriormente, los valores utilizados para el bruñido de las probetas toman como referencia estudios previos en los cuales se emplea dicha técnica, con el fin de perseguir resultados óptimos en cuanto a la caracterización superficial se refiere.

En el estado del arte (sección 2.1) se detallan los principales parámetros a fijar durante la técnica del bruñido con bola. No obstante, de entre todos los parámetros se ha escogido estudiar la dirección de las diferentes pasadas de bruñido por ser la variable menos referenciada en experimentos previos, con el fin principal de estudiar cuál es la influencia sobre las superficies tratadas. El resto de parámetros se seleccionan como fijos para toda la serie de experimentos a realizar, aprovechando los niveles óptimos de ensayo definidos por Jerez-Mesa (2018) [22], el valor de los cuales se detalla más adelante.

Además de la dirección del bruñido resulta interesante para el presente proyecto estudiar el efecto que produce la asistencia mediante vibraciones ultrasónicas al proceso, ya que se considera factor clave en cuanto a la introducción de tensiones residuales en los materiales, además de introducir cambios en cuanto a rugosidad y perfil de durezas se refiere. El tipo de vibración utilizada se basa en el estudio realizado por el Jerez-Mesa en su tesis (2018) [22], puesto que la herramienta utilizada en el presente experimento es la patentada en su trabajo.

Para la ejecución del experimento se emplean sendas probetas prismáticas de AISI1038 y AA2017-T4. En cada una de ellas se definen 4 huellas de bruñido, de dimensiones 15x15 mm, con el fin de realizar una combinación entre la dirección de bruñido adoptada y el empleo de la técnica convencional o asistida mediante vibraciones. De esta forma, se caracterizan las huellas de bruñido con los siguientes parámetros:

- Huella 1. Bruñido convencional, dirección paralela entre pasadas consecutivas ( $//$ , NVAB).
- Huella 2. Bruñido convencional, dirección perpendicular entre pasadas consecutivas ( $/\perp$ , NVAB).
- Huella 3. Bruñido asistido por vibraciones, dirección paralela entre pasadas consecutivas ( $//$ , VAB).
- Huella 4. Bruñido asistido por vibraciones, dirección perpendicular entre pasadas consecutivas ( $/\perp$ , VAB).

En la figura 14 se muestra esquemáticamente la disposición de las diferentes huellas de bruñido utilizada para ambas probetas.

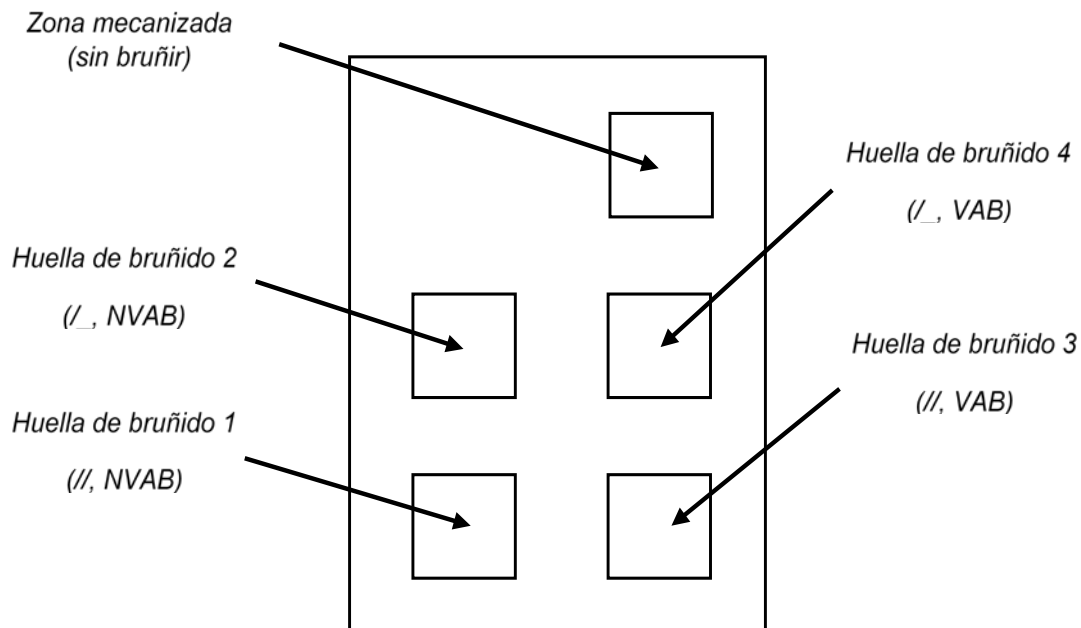


Figura 14. Esquematzación de la distribución de las huellas de bruñido sobre la superficie

Más adelante se muestran los valores seleccionados para el resto de los parámetros del proceso de bruñido.

## 3.2 Caracterización de los materiales

El experimento presentado en este proyecto se basa en el estudio de dos materiales de gran aplicación en el mundo industrial: el acero AISI1038 y el aluminio AA2017-T4.

### 3.2.1 Acero AISI1038

La aleación de acero AISI1038 se ha seleccionado por dos motivos fundamentales. Por una parte, existen numerosos estudios previos relacionados con el bruñido que emplean este material, por lo que se da continuidad a los resultados obtenidos en otras experimentaciones. Por la otra, se trata de un material utilizado en gran cantidad de piezas mecánicas debido a sus propiedades y la facilidad de mecanizado que presenta. El material se puede templar, por lo que puede usarse para la fabricación de piezas que funcionan en regímenes dinámicos, susceptibles de ser bruñidas.

Según la norma AISI, la composición del acero se muestra en la tabla 3:

<i>Elemento</i>	Fe	Mn	C	S	P
<i>Peso (%)</i>	98,6 – 99,05	0,6 – 0,9	0,35 – 0,42	≤ 0,05	≤ 0,04

*Tabla 3. Composición en peso del acero AISI1038*

En cuanto a las propiedades mecánicas del material éstas fueron caracterizadas en la tesis de Travieso-Rodríguez (2010) [8]. Debido a que la probeta empleada se obtiene de la misma barra de material, los valores tomados de este estudio se consideran válidos para la presente experimentación. En la tabla 4 se muestran las propiedades del acero AISI1038 utilizadas en este estudio:

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad	7840 kg/m <sup>3</sup>
Módulo elástico	211 GPa
Módulo de Poison	0,29

*Tabla 4. Propiedades del acero AISI1038*



### 3.2.2 Aluminio AA2017-T4

Por lo que a la aleación de aluminio AA2017-T4 respecta, resulta interesante su estudio debido al reciente crecimiento en su utilización dentro del campo industrial y, más concretamente, como principal material utilizado en la industria del molde. Además, los estudios realizados en torno a dicha aleación son más bien escasos, por lo que la caracterización de la superficie tras el proceso de bruñido adquiere una importancia notable.

Según la norma UNS, la composición del aluminio presentado se muestra en la tabla 5:

<i>Elemento</i>	Al	Si	Fe	Mn	Mg
<i>Peso (%)</i>	97,7	0,96	0,25	0,55	0,53

Tabla 5. Composición en peso del aluminio AA2017-T4

Igual que para el caso del acero, las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio utilizada se toman de los valores obtenidos por el Travieso-Rodríguez (2010) [8] por tratarse de una probeta obtenida de la misma barra de material.

En la tabla 6 se muestran las propiedades del aluminio AA2017-T4 utilizadas en este estudio:

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad	2800 kg/m <sup>3</sup>
Módulo elástico	78 GPa
Módulo de Poison	0,33

Tabla 6. Propiedades del aluminio AA2017-T4

## 3.3 Ejecución del experimento

La ejecución del experimento descrito consta básicamente de dos procesos:

- Mecanizado de la superficie de la probeta.
- Bruñido de las huellas descritas.

Ambos procesos se realizan en la misma máquina fresadora. Se ha utilizado una fresadora de tres ejes LAGUN 600 monitorizada por CNC Fagor. Además, sobre la mesa

de la máquina se ha equipado un dinamómetro KISTLER 9257B con el fin de controlar la fuerza del proceso en todo momento.



Figura 15. En la izquierda, dinamómetro KISTLER 9257B. En la derecha, fresadora LAGUN 600 con control CNC Fagor

### ***3.3.1 Mecanizado de las probetas***

Previamente a la operación de bruñido se requiere realizar un mecanizado sobre la superficie de ambas probetas, eliminando de este modo las posibles irregularidades y a la vez garantizando la planitud de la pieza tratada. Para tal efecto se fija la probeta en la fresadora CNC sobre el dinamómetro KISTLER, en la que se realiza un planeado sobre la superficie con las siguientes características:

<b>Herramienta</b>	Fresa de disco de diámetro 80 mm con 5 plaquitas de corte
<b>Plaquita de corte</b>	MEXIN 20-180-40-32
<b>Velocidad de corte</b>	90 m/min
<b>Avance</b>	200 mm/min
<b>Profundidad</b>	0,5 mm

Tabla 7. Parámetros seleccionados para el planeado de la superficie

La siguiente operación de mecanizado se aplica a la superficie de los materiales con el fin de obtener una calidad superficial de partida para la posterior aplicación del bruñido. Aunque esta operación no es imprescindible, diversos autores reflejan la importancia de la rugosidad inicial en la superficie antes de la aplicación de cualquier técnica de acabado, puesto que incide directamente sobre el resultado final. De esta forma se decide realizar un planeado utilizando una fresa hemisférica con el fin de obtener una rugosidad uniforme a lo largo de toda la probeta. Este tipo de acabado es especialmente interesante para poder comparar los resultados con los obtenidos

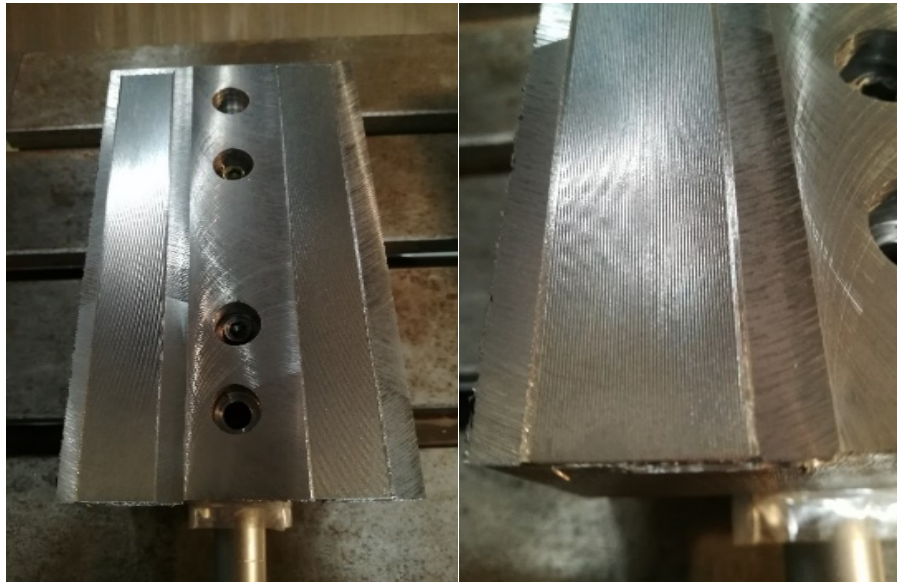
previamente por el grupo de investigación y, a su vez, posee gran relevancia industrial, ya que es empleado a menudo para acabar superficies complejas que requieren un mecanizado con fresa hemisférica en sucesivas pasadas. Por último, como se quiere analizar en este trabajo los efectos del bruñido desde el punto de vista de la anisotropía del material, esta estrategia de mecanizado da una superficie inicial altamente anisotrópica que permite evaluar de mejor forma dicho efecto del proceso de BAV.

Esta operación se realiza en la misma fresadora donde se ha efectuado el planeado inicial mediante un código CNC (véase Anexo 3) utilizando la herramienta y parámetros descritos a continuación:

<b><i>Diámetro fresa</i></b>	10 mm
<b><i>Ancho de pasada lateral</i></b>	0,4 mm
<b><i>Profundidad de pasada</i></b>	0,2 mm
<b><i>Avance</i></b>	600 mm/min
<b><i>Velocidad de corte</i></b>	190 m/min
<b><i>Pasadas laterales</i></b>	50

*Tabla 8. Parámetros para planeado con fresa hemisférica*

Tras el planeado de las probetas se obtiene una superficie homogénea a partir de la cual se realizará la posterior operación de bruñido. En la figura 16 se muestra la superficie obtenida tras dicha operación:



*Figura 16. Detalle de la superficie obtenida tras el mecanizado con fresa hemisférica*

### ***3.3.2 Bruñido de las superficies***

En el subcapítulo mostrado se describen los pasos seguidos para la aplicación del proceso de bruñido sobre las superficies de ambos materiales.

#### **3.3.2.1 Descripción de la herramienta de bruñido utilizada**

La asistencia mediante la introducción de vibraciones al proceso de bruñido es el parámetro determinante del presente proyecto, puesto que el objeto principal del experimento gira en torno a la evaluación del efecto que éstas producen sobre las tensiones residuales en los materiales descritos tras la aplicación del bruñido. De esta forma, la herramienta seleccionada para tal proceso debe incorporar un módulo capaz de asistir de esta forma al proceso.

Tomando en cuenta las anteriores consideraciones se selecciona la herramienta de bruñido diseñada y patentada por Jerez-Mesa en su tesis [22]. Dicha herramienta está compuesta por tres módulos que conjuntamente permiten realizar la operación de bruñido asistida por vibraciones.

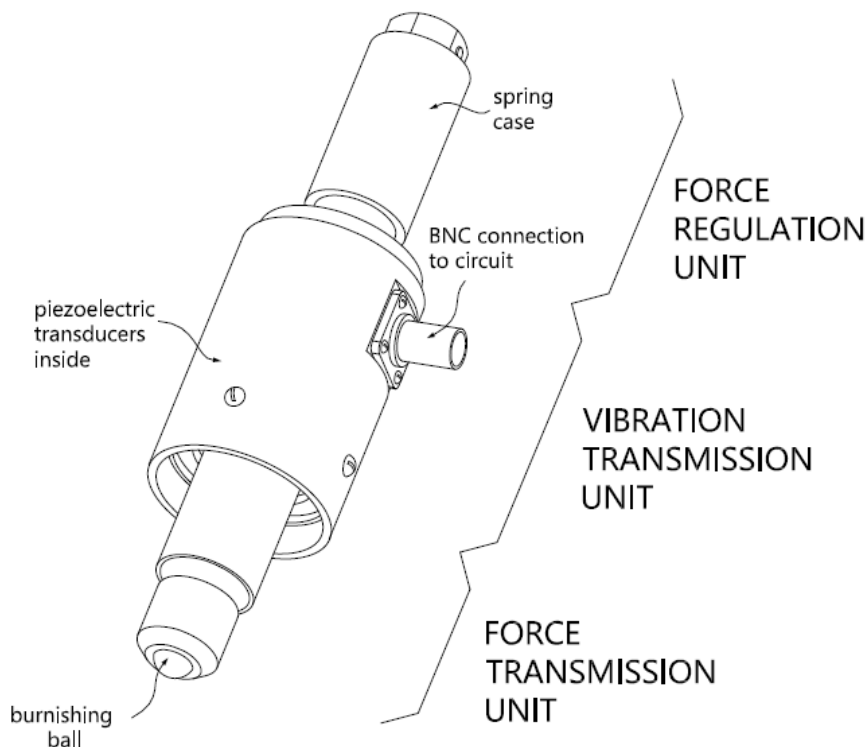


Figura 17. Esquematación de la herramienta de bruñido utilizada, diseñada por Jerez-Mesa [22]

En primera instancia se encuentra el módulo de regulación de la fuerza, el cual se diseña para suplir dos funciones en el proceso de implementación de la técnica. El

módulo incorpora un alojamiento cilíndrico de acero AISI1045, en el interior del cual se introduce un muelle que se deforma axialmente, guiado por una varilla central. De esta forma el sistema permite seleccionar voluntariamente el valor de la fuerza que se aplica al proceso en función del valor de compresión del muelle mientras la herramienta queda sujeta a la máquina por la parte superior del alojamiento cilíndrico.

Por lo tanto, el desplazamiento vertical que introduce la máquina sobre la herramienta de bruñido permite transmitir el valor de fuerza de precarga deseado cuando se comprime contra la superficie del material a tratar. La compresión que experimenta el muelle define la precarga que se aplica sobre el proceso, definida por la ley de Hooke:

$$F_p = F_0 + k \Delta z$$

Donde  $F_0$  se corresponde con la compresión del muelle previa a la aplicación de la técnica,  $k$  define la constante elástica del muelle y  $\Delta z$  indica la longitud comprimida por el muelle, definida por el desplazamiento vertical de la herramienta a partir del contacto con la superficie.

El módulo central de la herramienta se corresponde con la unidad destinada a la asistencia mediante vibraciones ultrasónicas. Como se ha comentado en capítulos previos, el módulo vibratorio está formado por un conjunto de transductores piezoeléctricos polarizados, los cuales varían su espesor en función de la frecuencia del campo eléctrico con el que se excitan. La variación cíclica en espesor que experimentan los piezoeléctricos permite introducir una componente adicional de fuerza vibratoria  $F_v$  al proceso de bruñido, de modo que la fuerza introducida por el muelle con el fin de conseguir el mismo efecto sobre la superficie se ve reducida.

La variación en espesor experimentada por los transductores piezoeléctricos se caracteriza por ecuaciones electromecánicas. No obstante, para el caso mostrado el desplazamiento experimentado por los piezoeléctricos se ve reducido a la dirección axial (ya que se polarizan únicamente en esta dirección), de forma que la ecuación queda simplificada de la siguiente forma:

$$\Delta t = q d_{33} V$$

Donde  $\Delta t$  define la variación de espesor experimentada por los piezoeléctricos,  $q$  indica el número de anillos piezoeléctricos instalados en la herramienta,  $d_{33}$  representa la constante piezoeléctrica en la dirección longitudinal y  $V$  define el voltaje del campo eléctrico con el que se excita la herramienta.

A partir de los experimentos previos realizados para la validación de la herramienta diseñada, en esta tesis [22] se establece una frecuencia de excitación de 40 kHz con la que se consigue un movimiento de resonancia de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . El espesor

indicado es amplificado mecánicamente por un sonotrodo instalado aguas debajo del módulo.

Finalmente, la herramienta incorpora un módulo de transmisión de la fuerza de bruñido con el que se consigue aplicar el proceso sobre la superficie del material. Dicho módulo está compuesto por un cabezal donde se aloja una bola de diámetro 10 mm que gira libremente cuando la herramienta se desplaza a lo largo de la superficie del material. La rodadura de la bola se consigue mediante un rodamiento formado por una guía circular en la cual se dispone un conjunto de esferas de pequeñas dimensiones que contactan directamente con la bola de bruñido, tal y como se muestra en la figura 18.

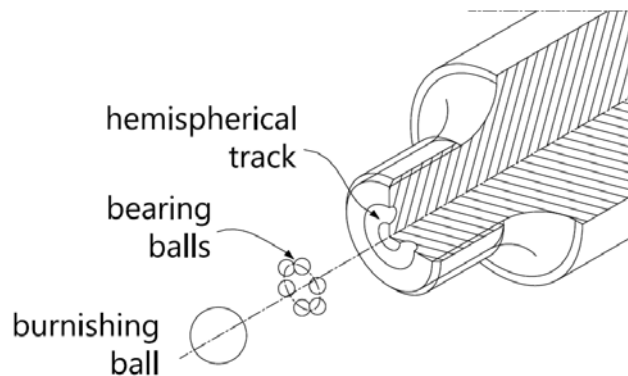


Figura 18. Esquemmatización del módulo de transmisión de fuerza de la herramienta diseñada por Jerez-Mesa [22]

Mediante el contacto de la bola con la superficie se consigue transmitir la fuerza de bruñido caracterizada por la siguiente expresión:

$$F_b = F_p + F_v$$

Cabe destacar que la componente de la fuerza introducida por las vibraciones solo se contempla cuando éstas asisten al proceso. En el caso del bruñido convencional, el valor de la fuerza depende únicamente de la compresión del muelle.

### 3.3.2.2 Calibración de la herramienta

La aplicación de la técnica de bruñido es la operación más determinante del proyecto, puesto que el objeto principal del experimento consiste en analizar el efecto que produce sobre las tensiones residuales en el material tratado.

En primera instancia se monta la herramienta de bruñido en la misma máquina fresadora donde se ha realizado el mecanizado de las probetas. Como se ha comentado, la fuerza que se transmite sobre la superficie durante la operación depende de la compresión que experimenta el muelle, y a su vez del desplazamiento vertical

introducido sobre la fresadora. Por lo tanto, se requiere una calibración previa de la herramienta, con el fin de obtener el valor de fuerza en función del desplazamiento vertical.

Para la calibración de la herramienta se utiliza el dinamómetro KISTLER, el cual permite sensar valores de fuerza sobre objetos que se ensamblen encima. De esta forma se introducen varios valores de desplazamiento sobre la herramienta, obteniendo la siguiente recta de calibración:

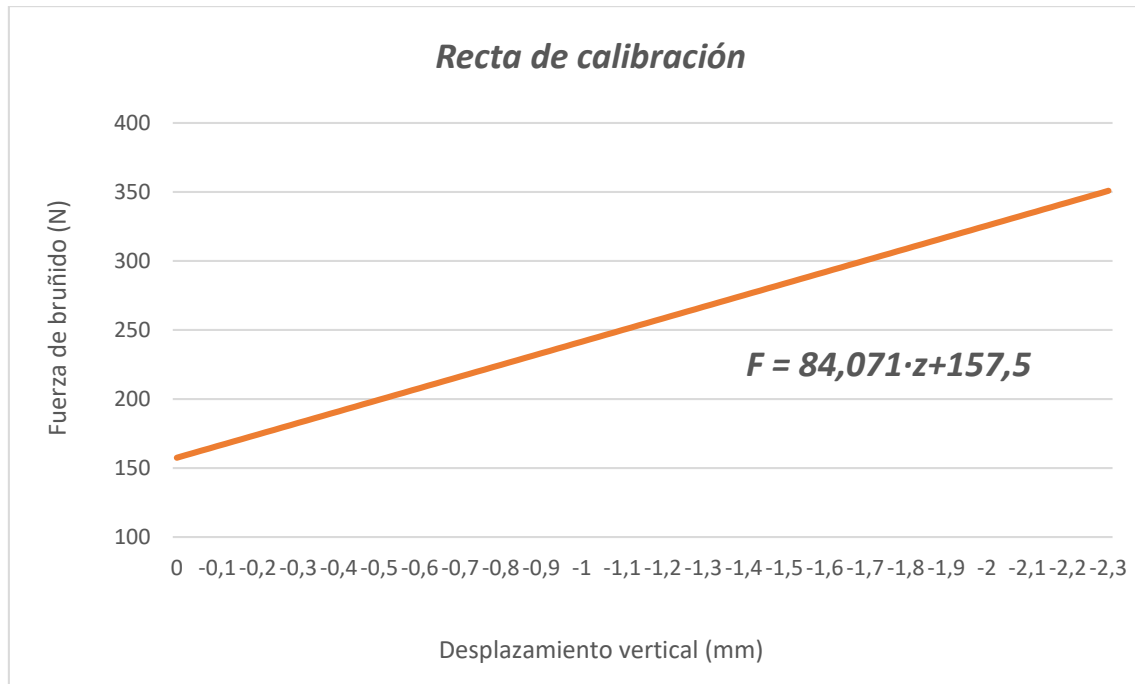


Figura 19. Recta de calibración para la herramienta de bruñido

El valor de la fuerza utilizada durante el experimento se basa en estudios previos [8]. Se selecciona una fuerza de bruñido de 270 N para el acero, por lo que se deberá comprimir el muelle en 1,34 mm según la recta de calibración mostrada. Para el caso del aluminio las fuerzas de bruñido se fijan a niveles más bajos, adoptando una fuerza de 135 N para este experimento y, en consecuencia, comprimiendo el muelle en 0,27 mm.

### 3.3.2.3 Aplicación del proceso

Una vez realizada la calibración de la herramienta se procede a bruñir la superficie del material. Para ello se requiere un nuevo código CNC en el que se indiquen los parámetros escogidos para el proceso, así como la trayectoria que sigue la herramienta (véase Anexo 3). En capítulos anteriores se indica la dirección adoptada para cada una de las huellas de bruñido, además de la comparativa realizada entre el proceso



convencional y la técnica asistida mediante vibraciones. El resto de parámetros se seleccionan según la bibliografía consultada tal y como se muestra en la tabla 9:

<b><i>Diámetro bola de bruñido</i></b>	10 mm
<b><i>Ancho de pasada lateral</i></b>	0,3 mm
<b><i>Avance</i></b>	600 mm/min
<b><i>Número de pasadas</i></b>	5
<b><i>Fuerza de bruñido</i></b>	270 N

Tabla 9. Parámetros constantes para la operación de bruñido

A continuación, se muestra una imagen de las probetas donde se pueden distinguir las huellas de bruñido anteriormente descritas.

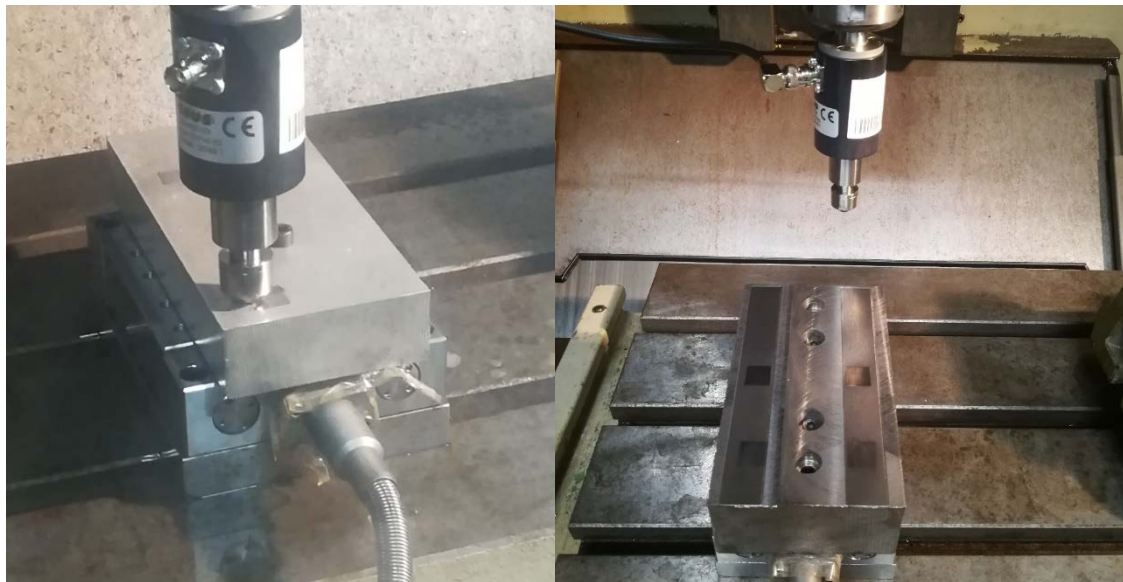


Figura 20. Huellas de bruñido. En la izquierda, probeta de aluminio AA2017-T4; en la derecha, probeta de acero AISI1038

### 3.4 Adquisición de los parámetros superficiales

El siguiente subcapítulo muestra el proceso adoptado con el fin de evaluar los principales parámetros topológicos en los que la operación de bruñido incide directamente: rugosidad superficial, dureza y tensiones residuales.



### 3.4.1 Evaluación de la topología superficial

A lo largo de la historia son numerosos los experimentos que se han llevado a cabo con el fin de cuantificar la variación en la rugosidad superficial de los componentes mecánicos. Como se ha comentado en capítulos anteriores, la rugosidad se define como la diferencia de cota entre distintos puntos de la superficie. La mayoría de las técnicas de acabado buscan reducir en la medida de lo posible las irregularidades a nivel superficial y, en consecuencia, reducir el desgaste entre piezas que presentan movimiento relativo entre ellas.

Tradicionalmente, la evaluación de la rugosidad superficial se ha realizado mediante procedimientos mecánicos, utilizando un rugsímetro. Este aparato de medición se basa en un palpador que recorre la superficie del material con el fin de sensor las diferencias de cota en distintos puntos.

Más recientemente, las mediciones entorno a la textura superficial se basan en la transformación de dicha superficie en funciones matemáticas que permiten discretizar la superficie y relacionar cada punto del material con un valor de cota, utilizando sistemas ópticos de medición [3]. La norma ISO 25178 recoge las principales funciones para la descripción de una superficie tridimensional, diferenciando dos grupos principales: parámetros S y parámetros V.

Por una parte, los parámetros S indican a nivel estadístico las características del perfil de cotas a nivel superficial, así como la distribución de las irregularidades y los puntos extremos a nivel de altura que presenta el material (picos y valles). Dichos parámetros se pueden relacionar con sus análogos en dos dimensiones, obtenidos a partir de la distribución lineal de cotas [22]. De entre el conjunto de parámetros S que define la norma ISO 25178 se destacan el valor de  $S_a$  y  $S_q$  como indicadores de la rugosidad superficial media del material. En la tabla siguiente se muestran los parámetros recogidos en la norma mencionada:

#### PARÁMETROS DE AMPLITUD

Textura media (mínimos cuadrados)	$S_q$
Oblicuidad	$S_{sk}$
Curtosis	$S_{ku}$
Textura media (aritmética)	$S_a$
Altura máxima de pico	$S_p$
Altura media medida en 10 puntos	$S_{10z}$
Altura máxima de valle	$S_v$

### PARÁMETROS ESPACIALES

Longitud de caída del coeficiente de autocorrelación	$S_{al}$
Ratio de aspecto textural	$S_{tr}$

### PARÁMETROS HÍBRIDOS

Gradiente medio por mínimos cuadrados	$S_{dq}$
Proporción de área interfacial	$S_{dr}$

### PARÁMETROS MISCELÁNEOS

Dirección de la textura principal	$S_{td}$
-----------------------------------	----------

Tabla 10. Parámetros S definidos en la norma ISO 25178 [11]

Por otra parte, se definen los parámetros complementarios V. Dichas variables representan una extensión de las curvas definidas por Abbott-Firestone, las cuales parametrizan la topología superficial de un material reduciéndola a variables más sencillas. El objetivo de este conjunto de parámetros es discretizar la superficie en zonas de picos y valles. De este modo el método asocia las zonas de picos como las causantes del desgaste entre piezas, mientras que los valles se relacionan como zonas de retención de lubricante [22].

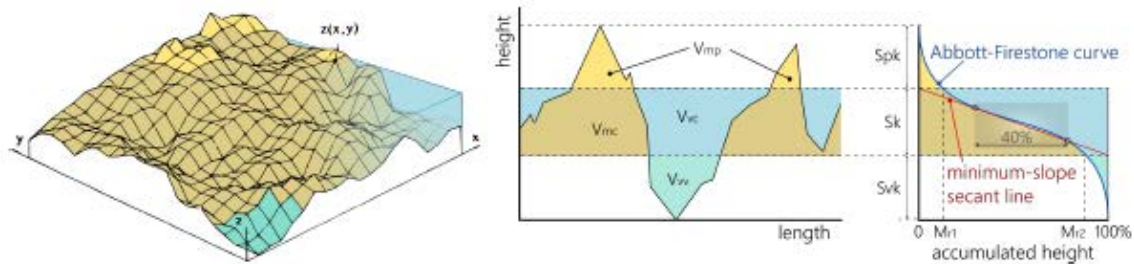


Figura 21. Parametrización de topologías superficiales mediante curvas de Abbott-Firestone [22]

Para la determinación de los parámetros mencionados se utiliza un medidor de perfiles óptico STIL Single Point Optical Sensor. Este instrumento basa su funcionamiento en la caracterización de superficies mediante sensores ópticos. De esta forma, la medición se realiza sin establecer contacto con la superficie, obteniendo resultados de gran precisión.

El principio de medición que utiliza el perfilómetro es el cromatismo: la dispersión producida en un haz de luz blanco varía en función de la longitud de onda cuando pasa a través de una lente convergente, por lo que el índice de refracción  $n$  es función de

dicha magnitud. De este modo, los rayos de luz con longitudes de onda reducidas cruzan el eje óptico a menor distancia que aquellos que presentan valores de longitud de onda más elevados.

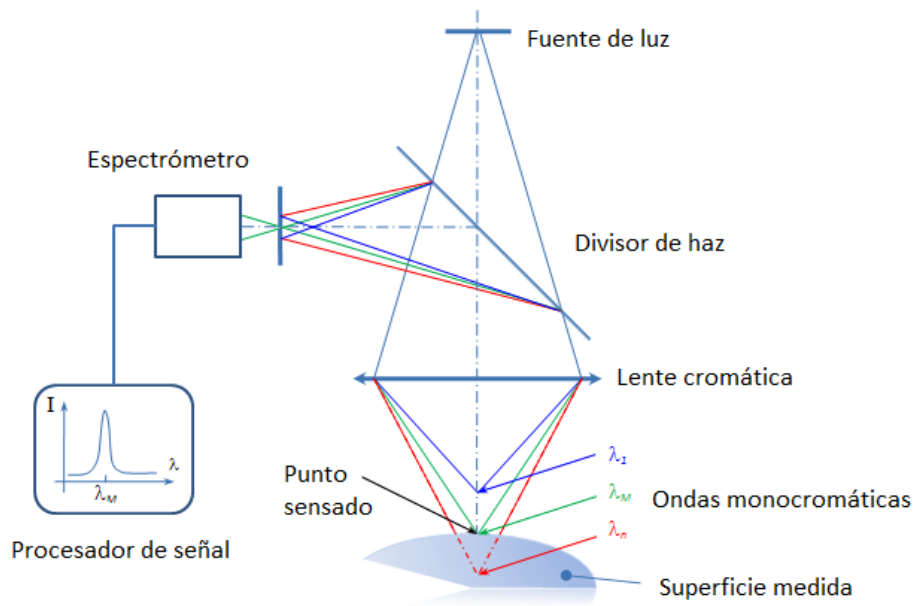


Figura 22. Esquemización del principio de cromatismo

La caracterización de la superficie del material mediante el medidor de perfiles ópticos se produce cuando el perfilómetro focaliza un haz de luz desde un emisor policromático hasta la superficie de la probeta, reflejándose de nuevo hacia los lentes cromáticos del instrumento. En función de longitud de onda de la luz captada por los sensores ópticos se establece la distancia desde el emisor hasta la superficie del material. Introduciendo un movimiento de avance sobre la probeta se obtiene el perfil de cotas superficiales, de forma que la rugosidad del material queda caracterizada.



Figura 23. Medidor de perfiles óptico STIL Single Point Optical Sensor

### 3.4.2 Evaluación de la dureza

La aplicación del bruñido sobre superficies metálicas resulta en un endurecimiento en frío de las capas más externas del material, debido a la deformación plástica que experimenta durante la aplicación del proceso. Por lo tanto, su evaluación cobra vital importancia en la caracterización metalográfica del material tratado mediante esta técnica de acabado.

El método normalizado para el desarrollo de este experimento se recoge en la norma ASTM E384, en la que se detalla la evaluación de la dureza Vickers. La preparación de la muestra incluye el corte del material por la zona de evaluación, con el fin de determinar la dureza en capas subsuperficiales, donde la técnica del bruñido produce efecto. Seguidamente la muestra se encapsula en resina para posteriormente aplicar un pulido en la zona de medida.

No obstante, el proceso seguido en el este proyecto difiere del método normalizado debido a la probeta estudiada. Las dimensiones de la muestra imposibilitan el proceso de corte y, a su vez, serrar la pieza mediante el método tradicional introduce tensiones residuales adicionales, modificando la estructura interna del material, por lo que se descarta la aplicación del método normalizado.

La experimentación se realiza en un durómetro Vickers Buehler 5114 como el que se muestra en la figura 24. La determinación de la dureza se realiza a partir de la aplicación de una carga prefijada sobre la superficie de estudio mediante un indentador en forma piramidal que incide sobre el material durante 10 s. El proceso resulta en el marcado de una huella en forma piramidal de dimensiones microscópicas sobre la muestra caracterizada por sus diagonales.

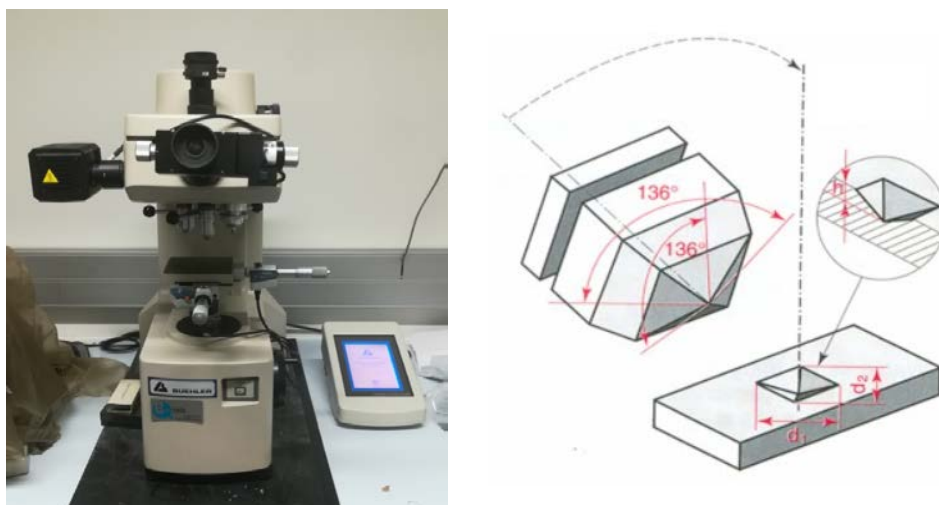


Figura 24. Durómetro Vickers Buehler 5114 y esquematización de la indentación [22]

El proceso sigue con la medida de ambas diagonales de la indentación mediante microscopía. La dureza Vickers (HV) se determina a partir de la siguiente expresión:

$$HV = \frac{1854,4 \cdot p}{d^2}$$

Donde  $p$  se corresponde con el valor de la carga aplicada por el indentador en gf y  $d$  representa el promedio de las diagonales de la huella en  $\mu\text{m}$ .

Como se ha comentado, la evaluación de la dureza a nivel de perfil queda imposibilitada en el experimento desarrollado. La alternativa adoptada consiste en la indentación de varias huellas piramidales sobre la superficie a diferentes cargas, incidiendo sobre diferentes profundidades del material en cada experimentación. Tras la determinación de la dureza Vickers para cada una de las marcas se estima la profundidad alcanzada en la medida a partir de la geometría del indentador y la diagonal de la huella. El valor de cota medido no se corresponde exactamente con el real debido a la recuperación elástica que experimenta el material; no obstante, en el presente estudio se determina la tendencia que sigue el perfil de dureza a medida que se incide sobre profundidades más elevadas. El proceso se repite en cada una de las huellas y en la superficie original, con el fin de determinar el efecto que introducen los diferentes parámetros de bruñido estudiados.

Cabe decir que la determinación de la dureza Vickers únicamente se aplica en el aluminio AA2017-T4 para el proyecto desarrollado. Las sucesivas mediciones de tensión residual sobre el acero AISI1038 imposibilitan la medición de la dureza en este material para el trabajo presentado.

### ***3.4.3 Evaluación de las tensiones residuales***

En el presente subapartado del proceso experimental se aborda la caracterización de las tensiones residuales introducidas por la técnica del bruñido en los dos materiales a tratar. De este modo se realiza una comparativa entre la superficie mecanizada y aquellas zonas donde se aplica la técnica de acabado.

La técnica seleccionada para dicha evaluación es el método IHD anteriormente descrito en el capítulo previo. La elección de este método se sustenta en los requerimientos del experimento a realizar. Por una parte, la selección de una técnica no destructiva no sería adecuada, puesto que se pretenden analizar las tensiones hasta capas del material a 2 mm de profundidad respecto a la superficie, donde los efectos del bruñido tienen lugar por ser un proceso de acabado superficial. Por otra parte, se desea generalizar el proceso para posteriores aplicaciones a nivel industrial, por lo que la elección de una técnica destructiva imposibilita el uso del componente analizado. De

este modo, el IHD se presenta como la técnica más adecuada para el presente proyecto. No obstante, cabe destacar que el método es incremental, por lo que no se obtiene el valor exacto de la tensión residual a cada profundidad del material, sino que se evalúa la variación a nivel tensional que experimenta el material a cada profundidad respecto a la capa inmediatamente anterior.

Como se ha comentado anteriormente, la aplicación de esta técnica se basa en captar las variaciones a nivel tensional que se producen al mecanizar un taladro de pequeñas dimensiones centrado en una roseta de galgas extensiométricas. La aplicación de la técnica se detalla en la norma ASTM-E837-08, por lo que en todo momento se intentará realizar la técnica según dicha normativa.

El primer paso para la aplicación de esta técnica es el pegado de las rosetas de galgas centradas en la zona de la probeta donde se ha aplicado el bruñido. Para el presente experimento se han seleccionado rosetas de galgas HBM modelo RY21-3/120, con terminales de soldadura LS5. Aunque el modelo seleccionado no presenta dimensiones acordes con la normativa, en ella se detallan coeficientes para la corrección de las desviaciones dimensionales.

A la hora de situar las galgas sobre la superficie de la probeta se tendrá en cuenta la dirección en la cual se posicionan. La roseta utilizada presenta un total de 3 galgas, dos de ellas (indicadas como galga A y galga C sobre la roseta) se sitúan a 90° una con respecto a la otra, mientras que una tercera galga (indicada como galga B sobre la roseta) se orienta a 135° respecto a las otras dos. Se decide orientar la galga C en la misma dirección en la que se ha realizado el mecanizado con fresa hemisférica, quedando la galga A en dirección perpendicular al fresado y la galga B oblicua a las otras dos.

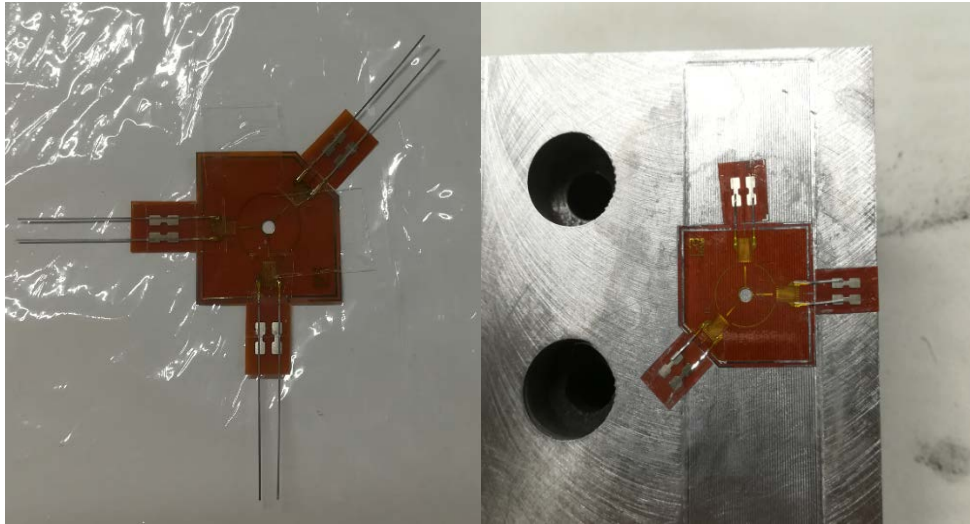
El pegado de las galgas sobre la superficie del material requiere un proceso minucioso con el fin de establecer un perfecto contacto y evitar que la roseta se despegue durante el mecanizado del taladro. De este modo, se deben tener una serie de consideraciones:

- Durante el montaje de los terminales se debe garantizar que no existe separación con el borde de la galga, evitando cortocircuitos por contacto directo entre los conductores de la galga y el metal analizado.
- Tanto la superficie de la galga como de la probeta deberán estar libres de impurezas con el fin de garantizar un pegado óptimo. De este modo, se realiza un pulido manual de la superficie de la probeta para eliminar restos de óxido, así como una limpieza de impurezas de ambas superficies en contacto aplicando un solvente orgánico de acetona como el RMS1.
- El pegamento se debe extender de forma uniforme sobre la superficie donde se instale la galga. El adhesivo utilizado debe contener una base de cianocrilato, de forma que se utiliza el adhesivo comercial LOCTITE.



- Durante el pegado de la galga se debe ejercer una presión uniforme sobre la superficie de la roseta durante un minuto aproximadamente.
- Previamente a la realización del taladro, se debe esperar 24 horas para garantizar el secado del adhesivo.

Tras el pegado de la galga se cortan los conductores a la longitud adecuada para la posterior soldadura sobre los terminales.



*Figura 25. Montaje de los terminales y pegado de las rosetas de galgas sobre el material de estudio*

El segundo paso para la aplicación de la técnica comprende el conexionado de la roseta de galgas con el instrumento de medición. Para este experimento se utiliza el aparato de medición para ordenador Spider8-30 con 8 canales de entrada habilitados para conectores DMS de 15 patillas. Cada una de las galgas que componen la roseta actúa como sensor independiente, por lo que se emplean 3 de los canales, cada uno de ellos evaluando la tensión en una dirección del plano.

Cada una de las galgas extensiométricas actúa como una resistencia eléctrica (para la roseta seleccionada la resistencia de cada galga es de  $120\ \Omega$ ) con un terminal de entrada y otro de salida. Un tercer cable se une a unos de los terminales con el fin de eliminar el valor resistivo introducido por la longitud del circuito. El circuito de medición entre la galga y el terminal del Spider8-30 se configura según un cuarto de puente de Wheastone, uniendo los conductores a los terminales mediante soldadura con estaño.

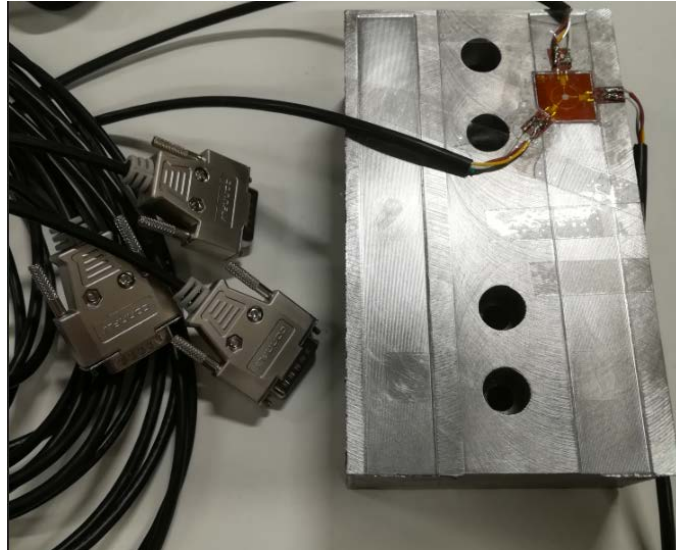


Figura 26. Conexión de las galgas con el Spider8-30

Una vez pegadas las galgas y montados los circuitos electrónicos se procede al mecanizado del taladro para la evaluación de las tensiones residuales. Para ello se montará la probeta sobre la KISTLER en la fresadora. Las dimensiones del taladro, así como los parámetros para el mecanizado se determinan en la norma anteriormente citada.

Según la norma ASTM-E837-08, para una roseta de galgas con las dimensiones indicadas y una distribución de tensiones variable en función de la profundidad (se debe recordar que el efecto del bruñido es a nivel superficial) el diámetro del taladro debe estar comprendido entre 2,75 y 3,25 mm, por lo que se decide seleccionar brocas HSS de diámetro 3 mm. Además, en la misma norma se indica que el incremento de profundidad entre pasadas debe ser de 0,10 mm como máximo, por lo que se decide mecanizar con pasadas a 0,05 mm obteniendo un perfil tensional más preciso en profundidad. En cuanto a profundidad máxima de estudio, la norma establece como máximo un valor de 0,4 veces el diámetro de la roseta. Para el experimento mostrado, la profundidad máxima es de 4 mm, por lo que se cumple con los 2 mm de profundidad a los cuales se desea sensar.

Para el mecanizado del taladro se implementará un código CNC en la fresadora (véase Anexo 3). El valor para las coordenadas en el plano XY se fijarán previamente a la ejecución del programa, mientras que el valor incremental en la dirección Z viene determinado por el código. El origen en la dirección vertical se corresponde con la superficie de la probeta; la determinación de este punto se realiza con la ayuda de la KISTLER: se establece el origen del eje vertical el punto donde la punta de la broca contacta con la superficie.

Los parámetros utilizados para el mecanizado del taladro se recogen en la tabla 11:



<b>Velocidad de giro</b>	6000 rpm
<b>Diámetro del taladro</b>	3 mm
<b>Avance</b>	25 mm/min
<b>Profundidad total</b>	2 mm
<b>Incremento entre pasadas</b>	0,05 mm

Tabla 11. Parámetros utilizados en el mecanizado del taladro incremental

Durante todo el proceso de mecanizado del taladro se tomarán los datos de elongación experimentados por cada una de las galgas con la ayuda del Spider8-30 con el fin de evaluar los valores de tensión para cada profundidad.

Cabe destacar que tras el mecanizado del taladro para cada una de las profundidades las galgas requieren un tiempo de estabilización con el fin de obtener un valor preciso de la elongación, debido a la recuperación elástica que experimenta el material. De esta forma, se fija un tiempo de espera de 15 segundos entre cada una de las pasadas.



Figura 27. Mecanizado del taladro incremental sobre la probeta

A partir del valor de elongación experimentado por las galgas se determina el estado tensional del material. El valor de las tensiones principales en el material depende de sus propiedades mecánicas y, más en concreto, del módulo elástico y el coeficiente de Poisson [20]:

$$\sigma_{11} = -A^* \cdot (\Delta\varepsilon_A + \Delta\varepsilon_C) + B^* \cdot \sqrt{(\Delta\varepsilon_A + \Delta\varepsilon_C - 2 \cdot \Delta\varepsilon_B)^2 + (\Delta\varepsilon_C - \Delta\varepsilon_A)^2}$$

$$\sigma_{22} = -A^* \cdot (\Delta\varepsilon_A + \Delta\varepsilon_C) - B^* \cdot \sqrt{(\Delta\varepsilon_A + \Delta\varepsilon_C - 2 \cdot \Delta\varepsilon_B)^2 + (\Delta\varepsilon_C - \Delta\varepsilon_A)^2}$$

Donde  $\Delta\varepsilon$  se corresponde con la elongación experimentada por cada una de las galgas en el intervalo correspondiente. Los valores de  $A^*$  y  $B^*$  se corresponden con los coeficientes mecánicos del material estudiado:

$$A^* = \frac{A}{4 \cdot E}$$

$$B^* = \frac{B}{4 \cdot E}$$

Donde  $E$  representa el valor del módulo elástico del material experimentado. En cuanto a los coeficientes  $A$  y  $B$ , estos se calculan en función de los valores geométricos de la roseta de galgas utilizada:

$$A = \frac{a^2 \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot r_0 \cdot r_i}$$

$$B = \frac{2 \cdot a^2}{r_0 \cdot r_i} \cdot \left( 1 - \frac{a^2 \cdot (1 + \nu) \cdot (r_0^2 + r_0 \cdot r_i + r_i^2)}{4 \cdot r_0^2 \cdot r_i^2} \right)$$

Donde  $a$  se corresponde con el radio de la broca utilizada durante la aplicación del método y  $r_i$  y  $r_o$  representan el radio interno y externo respectivamente definido por la distribución de las galgas sobre la roseta.

Finalmente se calcula la tensión equivalente de Von Mises a partir de las tensiones principales:

$$\sigma^{VM} = -\sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - \sigma_{11} \cdot \sigma_{22}}$$

Este último valor da una idea del estado tensional global de la superficie. De este modo, se ha planteado como el principal parámetro a tener en cuenta en la comparación de las distintas condiciones de bruñido.

## 4. Resultados y cálculos derivados del proceso experimental

El presente capítulo muestra los resultados derivados del proceso experimental detallado en el apartado anterior. El objetivo es establecer una comparativa entre el comportamiento mostrado por los dos materiales estudiados en el proyecto tras la aplicación del proceso de bruñido, así como la respuesta ofrecida por un mismo material frente a la aplicación de la técnica empleando distintos parámetros.

### 4.1 Textura superficial

Tras la caracterización de las diferentes huellas de bruñido en la superficie de ambos materiales y de la superficie original, el objetivo del este subcapítulo es determinar la influencia de los parámetros con los que se ha llevado a cabo el bruñido sobre el resultado final en cuanto a textura superficial.

Los parámetros que describen con mayor exactitud la superficie del material son los parámetros S. A continuación, se detallan aquellos que son determinantes en cuanto a la caracterización superficial de los materiales tras el bruñido (en el Anexo 4 se muestran todos los parámetros calculados):

- Los parámetros  $S_a$  y  $S_q$  son indicadores de la rugosidad media a nivel superficial.
- La oblicuidad  $S_{sk}$  indica la relación entre el número de picos y valles que presenta la superficie del material. Valores próximos a 3 indican una distribución Gaussiana de picos y valles a lo largo de la superficie.
- La curtosis  $S_{ku}$  determina la distribución de picos en la superficie. Valores próximos a 0 indican una distribución Gaussiana de los picos a lo largo de la superficie.
- El parámetro  $S_{td}$  expresa la dirección en la cual se orienta la textura que define la superficie.

A partir de los datos obtenidos tras la caracterización de las probetas en el medidor de perfiles se grafican los resultados que siguen a continuación.

### 4.1.1 Acero AISI1038

Por lo que a la caracterización superficial del acero AISI1038 se refiere, estudios previos muestran la notable influencia del proceso de bruñido sobre el perfil del material. De este modo, el objetivo que persigue es analizar el efecto que produce la variación de los parámetros de bruñido citados anteriormente.

En primera instancia se abordan los parámetros de rugosidad superficial media en las cuatro huellas bruñidas, comparándolas a su vez con la superficie original mecanizada con fresa hemisférica.

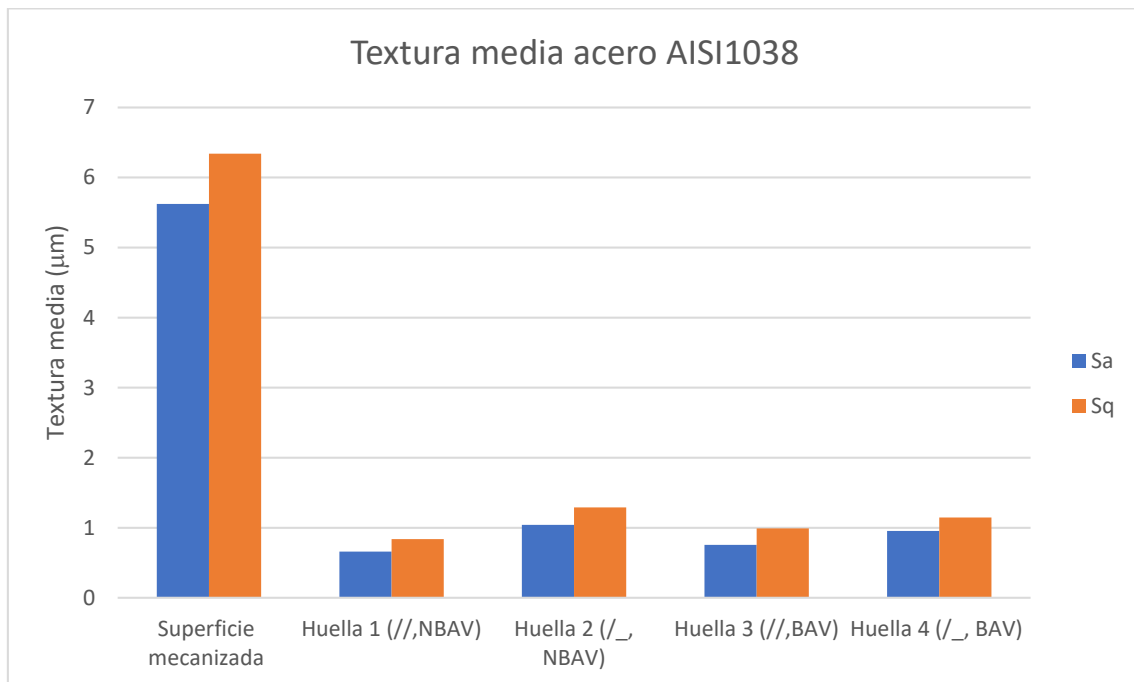


Figura 28. Parámetros de textura media del acero AISI1038

Tras analizar los valores en las distintas huellas se observa como la aplicación del proceso de bruñido reduce en gran medida el valor de rugosidad media hasta valores en torno al 80 % por debajo de la rugosidad media en la superficie original. No obstante, no se observa una influencia clara de la dirección de pasada adoptada para el bruñido de la superficie. De igual forma, la introducción de vibraciones al proceso no evidencia una mejora en el resultado. Estos valores eran previsibles, dado que la influencia positiva de las vibraciones para reducir en mayor medida los niveles de textura inicial sólo son notables si la superficie de partida tiene presenta una rugosidad media inferior a 2 μm.

En segunda instancia se abordan los parámetros de oblicuidad y curtosis, los cuales son indicadores de cómo los picos y valles se distribuyen a lo largo de la superficie del material.

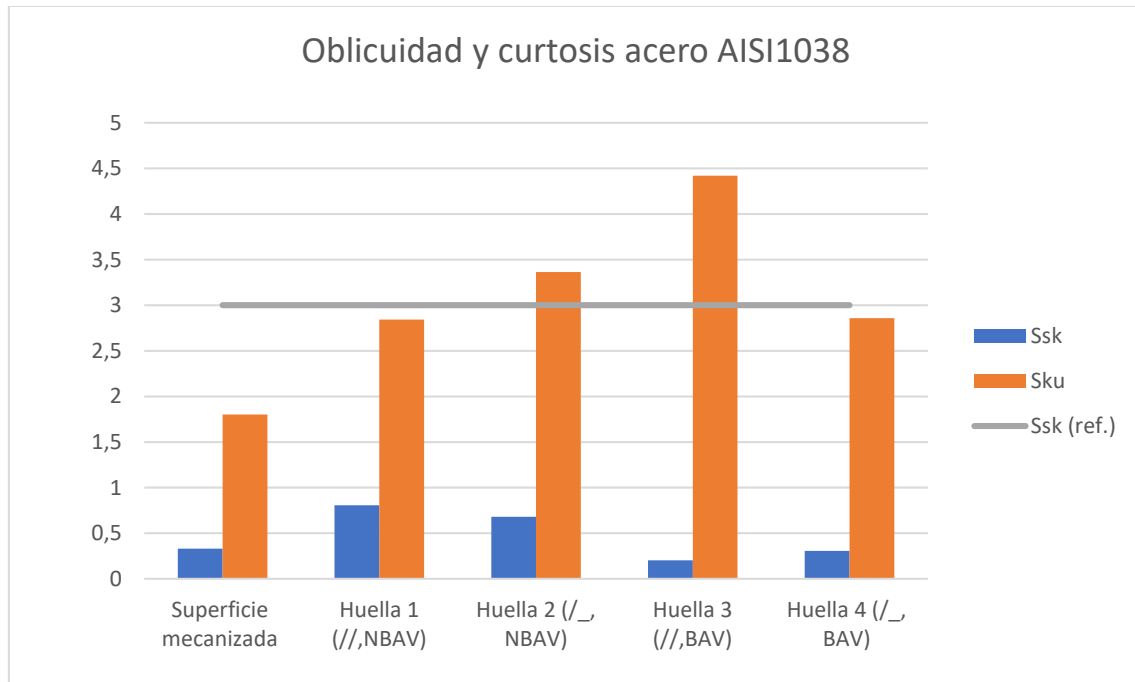


Figura 29. Oblicuidad y curtosis del acero AISI1038

Tal y como era de esperar, tras la aplicación del proceso de bruñido las cuatro huellas muestran valores de oblicuidad y curtosis próximos a la distribución Gaussiana o normal. El proceso deforma por completo la superficie original, redistribuyendo picos y valles de forma que se equilibren para dar una superficie menos abrupta. No obstante, en cuanto a la distribución superficial se puede observar cierta influencia de la variación en los parámetros de bruñido.

En cuanto a la oblicuidad se observa como las huellas en las cuales se ha asistido al bruñido mediante vibraciones adopta valores próximos a cero, de forma que la superficie se caracteriza por mostrar un número de picos similar al de valles. Por el contrario, la aplicación del proceso convencional resulta en valores de oblicuidad ligeramente positivos, lo que indica que el número de valles es superior al de picos. Respecto a la curtosis se muestra una clara influencia de la dirección de bruñido adoptada. La aplicación del proceso mediante pasadas perpendiculares entre ellas resulta en valores de curtosis próximos a 3, lo que indica una distribución normal de los picos a lo largo de la superficie tratada. En cuanto a las huellas en las que el bruñido se ha aplicado en forma de pasadas paralelas, los valores de curtosis se alejan del valor que caracteriza una distribución Gaussiana.

En última instancia se aborda la dirección de la textura que define la superficie, definida por el parámetro  $S_{td}$ . En la siguiente tabla se muestran los valores para dicho parámetro en cada una de las huellas:

	<b>Superficie mecanizada</b>	<b>Huella 1</b>	<b>Huella 2</b>	<b>Huella 3</b>	<b>Huella 4</b>
<b><math>S_{td} (^{\circ})</math></b>	141,34	88,82	88,78	89,09	89,35

Tabla 12. Dirección de la textura principal en las huellas de bruñido del acero AISI1038

Tal y como se observa, la aplicación del proceso de bruñido cambia por completo la dirección de la textura respecto a la superficie original. La operación deforma por completo la superficie original, la cual difiere en gran medida de la superficie mecanizada con la fresa hemisférica. El nuevo perfil textural que muestra la superficie sigue la dirección de la última pasada de bruñido y, en consecuencia, las cuatro huellas muestran una misma dirección perpendicular a la original, puesto que en todas ellas (tanto las bruñidas mediante pasadas paralelas como perpendiculares entre ellas) la última pasada de la operación es perpendicular al mecanizado inicial.

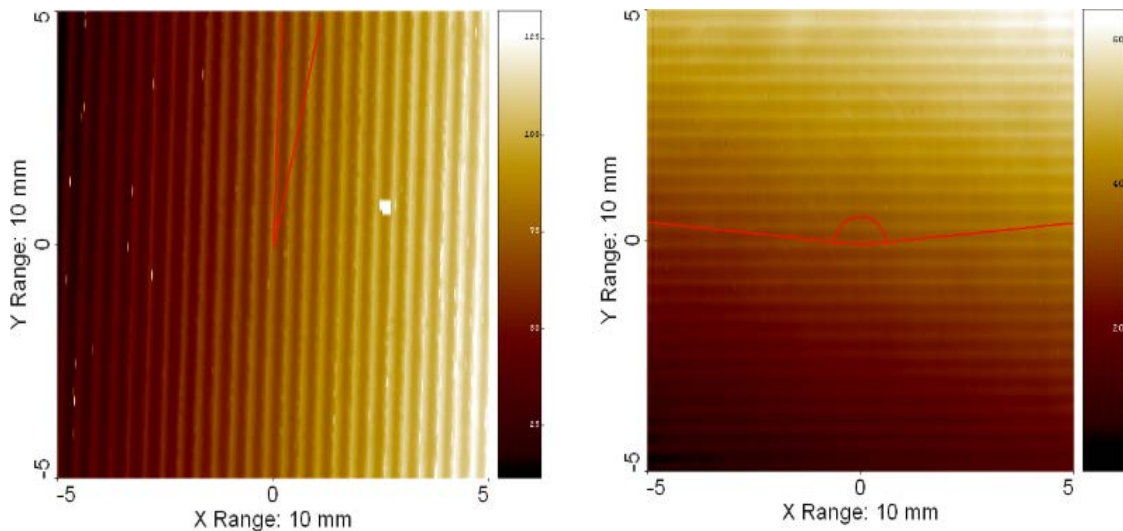


Figura 30. Cambio en la dirección de la textura principal tras la operación de bruñido en acero AISI1038. En la izquierda, superficie original; en la derecha, superficie bruñida.

#### 4.1.2 Aluminio AA2017-T4

En cuanto a la caracterización superficial del aluminio AA2017-T4 las referencias bibliográficas son escasas, de modo que la cuantificación del efecto producido tras la aplicación del bruñido sobre este material cobra vital importancia.

En primera instancia se grafican los valores de rugosidad superficial media en cada una de las huellas de bruñido realizadas.

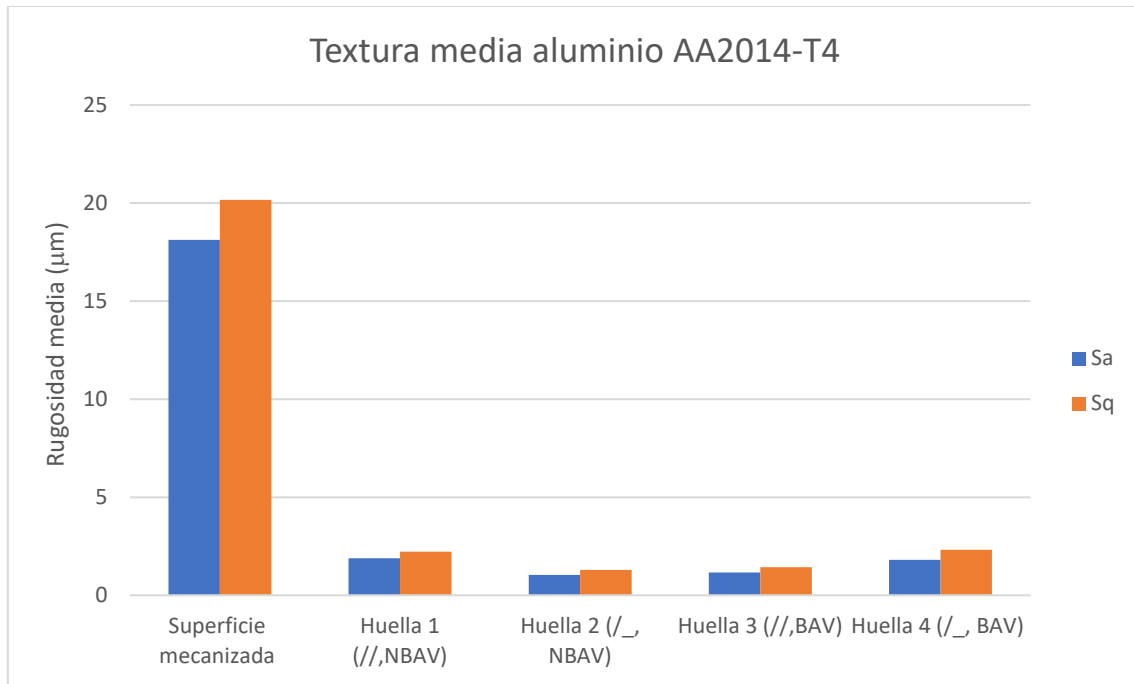


Figura 31. Parámetros de textura media del aluminio AA2017-T4

Igual que para el caso del acero, la implementación del proceso de bruñido sobre la superficie del aluminio AA2017-T4 introduce cambios notables en cuanto a valores de rugosidad media se refiere. Tanto los valores de  $S_a$  como de  $S_q$  experimentan una reducción de aproximadamente el 85 % respecto a los valores medidos en la superficie mecanizada. No obstante, para el caso del aluminio tampoco se evidencia el efecto producido un cambio en los parámetros de bruñido citados ya que, tal y como se muestra, los valores de rugosidad media son similares en las cuatro huellas bruñidas.

En segunda instancia se definen los valores adoptados por los indicadores de distribución superficial de oblicuidad y curtosis, los cuales se grafican en la figura 32.

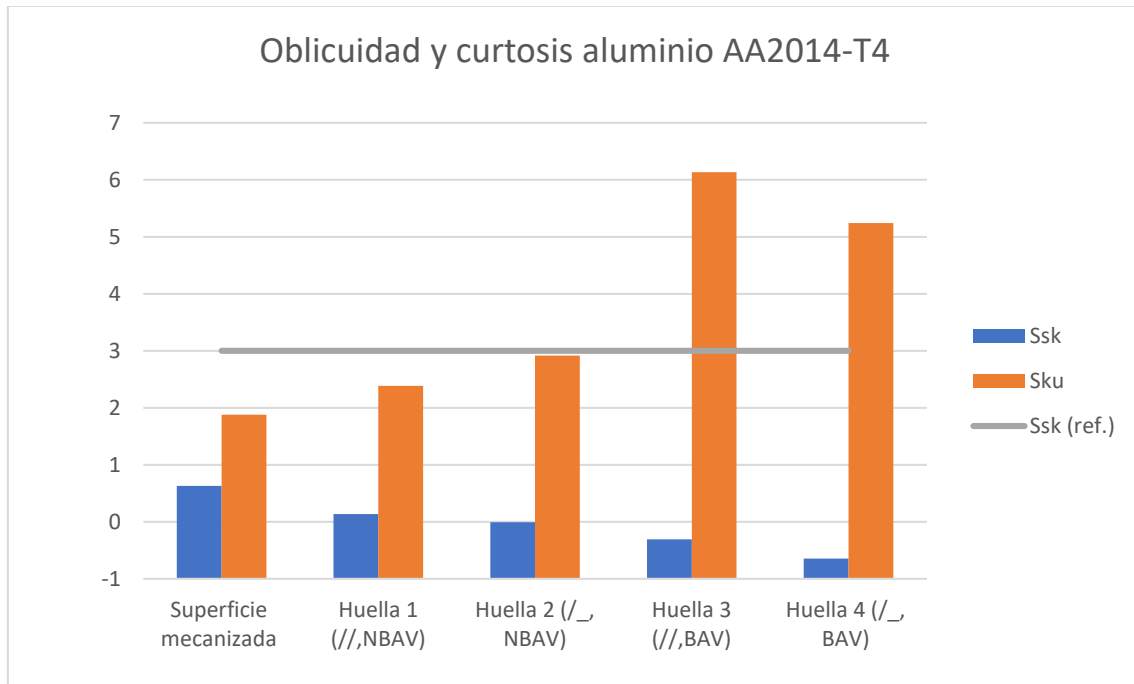


Figura 32. Oblicuidad y curtosis del aluminio AA2017-T4

Para el caso mostrado se observa como en todas las huellas de bruñido se produce un cambio en la distribución de picos y valles a lo largo de la superficie. En cuanto a la dirección adoptada para las diferentes pasadas de bruñido no se puede establecer una clara influencia tras la variación de dicho parámetro. No obstante, para el caso del aluminio se muestra una clara influencia de la asistencia mediante vibraciones al proceso. En cuanto a la curtosis se refiere, se observa como para las huellas en las que se aplica el proceso convencional adopta valores próximos a 3, lo que refleja una distribución Gaussiana de los picos a lo largo de la superficie. De igual forma, el valor de la oblicuidad para las zonas bruñidas sin vibraciones adopta valores cercanos a cero, de modo que se iguala el número de picos y valles a nivel superficial. Por el contrario, en las dos probetas bruñidas con la asistencia de vibraciones se observa un valor de curtosis por encima de 5, además de un valor para la oblicuidad ligeramente negativa. De este modo, ambas huellas no siguen una distribución Gaussiana de picos y valles a lo largo de la superficie, en la cual el número de crestas sería superior. Esto refleja que, en el caso del aluminio, la asistencia mediante vibraciones da lugar a una superficie mucho más abrupta y, por lo tanto, con mayor tendencia al desgaste en servicio con respecto a la superficie tratada sin vibraciones. Desde este punto de vista, la asistencia al proceso es desaconsejada para este material.

Finalmente se estudia el efecto producido sobre la dirección de la textura principal a lo largo de la superficie.



	<b>Superficie mecanizada</b>	<b>Huella 1</b>	<b>Huella 2</b>	<b>Huella 3</b>	<b>Huella 4</b>
<b><math>S_{td} (^{\circ})</math></b>	0	88,85	89,08	87,03	88,90

Tabla 13. Dirección de la textura principal en las huellas de bruñido del aluminio AA2017-T4

Para el caso del aluminio, el proceso de bruñido también cambia por completo la dirección de la textura principal con respecto a la superficie original mecanizada con fresa hemisférica. Igual que para el caso del acero, la superficie queda deformada respecto a la original, adoptando como dirección de la textura principal la perpendicular a la del mecanizado.

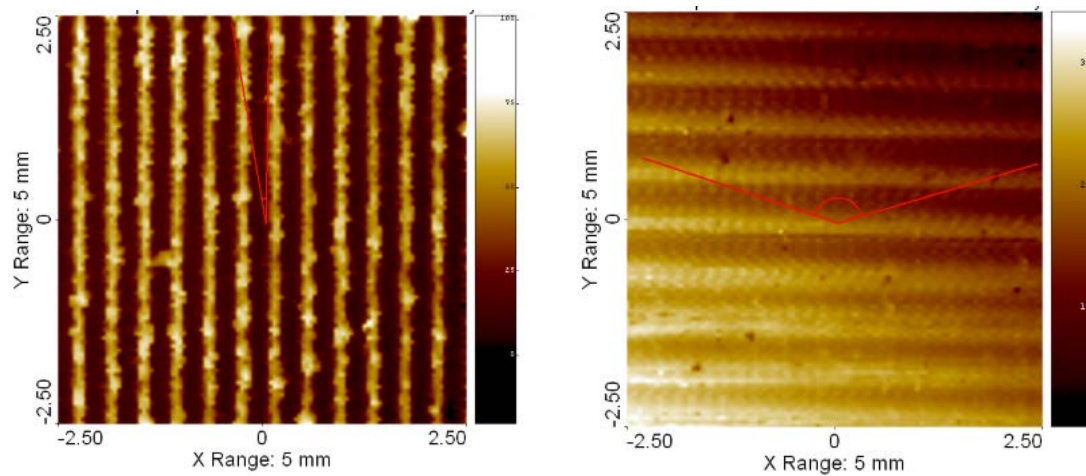


Figura 33. Cambio en la dirección de la textura principal tras la operación de bruñido en aluminio AA2014-T4. En la izquierda, superficie original; en la derecha, superficie bruñida.

### 4.1.3 Comparativa de los resultados entre los materiales

Tras la evaluación de la textura superficial del acero AISI1038 y del aluminio AA2017-T4 tras el bruñido de las cuatro huellas con la combinación de parámetros citada anteriormente sobre la superficie original mecanizada con fresa hemisférica se pueden establecer una serie de conclusiones:

- La operación del bruñido deforma por completo la superficie original, obteniendo un perfil superficial que difiere en gran medida del obtenido tras un proceso de mecanizado.
- A nivel de textura media se consiguen valores hasta el 85 % por debajo de los obtenidos tras un proceso de mecanizado en ambos materiales.
- La variación de la dirección entre las diferentes pasadas de bruñido no ofrece una variación significativa en los parámetros de rugosidad estudiados

para el caso del aluminio. No obstante, para el acero la variación de la dirección entre las diferentes pasadas de bruñido induce una distribución Gaussiana de picos a lo largo de la superficie.

- En cuanto a la dirección de la textura principal de la superficie tras el bruñido, ésta se caracteriza en función de la dirección adoptada en la última pasada del proceso.
- Para el caso del acero, la introducción de vibraciones al proceso de bruñido no ofrece cambios sustanciales en los parámetros superficiales. Por lo contrario, para el caso del aluminio la aplicación de este tipo de asistencia afecta en gran medida el resultado final, hasta el punto de producir efectos indeseados. Dados los valores determinados para la oblicuidad y curtosis de las huellas bruñidas con vibraciones la distribución de picos y valles a lo largo de estas superficies se aleja de una distribución Gaussiana. Esto se debe a que el aluminio es un material altamente deformable, por lo que se produce un apilamiento del material durante la operación de bruñido, alejándose de la distribución normal. Por lo tanto, se concluye que la asistencia mediante vibraciones en el bruñido del aluminio AA2017-T4 induce resultados desfavorables.

## 4.2 Perfil de durezas

Como se ha mencionado, la determinación de la dureza en las diferentes huellas de bruñido se realiza mediante la aplicación de distintas cargas sobre la superficie a través de un indentador de forma piramidal.

Con el fin de conseguir un resultado representativo, para cada una de las huellas de bruñido y para la superficie original mecanizada se aplican tres cargas, llegando a distintas profundidades del material. Además, se repite el proceso un total de 10 veces para cada carga aplicada, obteniendo un total de 30 muestras para cada huella de estudio.

Una vez realizadas las mediciones se calcula el promedio de dureza para cada carga en cada una de las zonas experimentadas. El cálculo de la media aritmética introduce un error estadístico que sigue una distribución t-student por tratarse de un número reducido de muestras que sigue la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{s_d}{\sqrt{n}} \cdot t_{\alpha, n-1}$$

Donde  $s_d$  representa la desviación estándar y  $n$  indica el tamaño de la muestra. Por su parte, el parámetro  $t_{\alpha, n-1}$  se corresponde con el estadístico t-student para el intervalo de confianza seleccionado del 95 %.

Los valores de dureza HV para cada carga se asocian con la profundidad, obtenida a partir del ángulo que presenta la punta del indentador, de  $136^\circ$ , y del diámetro medio de la huella medida. Cabe recordar que el valor de profundidad no se corresponde exactamente con el valor real. No obstante, las cotas calculadas para cada una de las cargas muestran una idea del perfil que sigue la dureza del material tras el bruñido a medida que se indenta sobre capas más interiores.

Finalmente, se comparan los valores obtenidos para cada huella de bruñido en el aluminio AA2017-T4 con el valor de dureza original.

#### 4.2.1 Aluminio AA2017-T4

Tras realizar las distintas mediciones sobre la probeta de aluminio AA2017-T4 se grafican los resultados de dureza Vickers en función de la profundidad, con las correspondientes barras de error según la distribución de t-student:

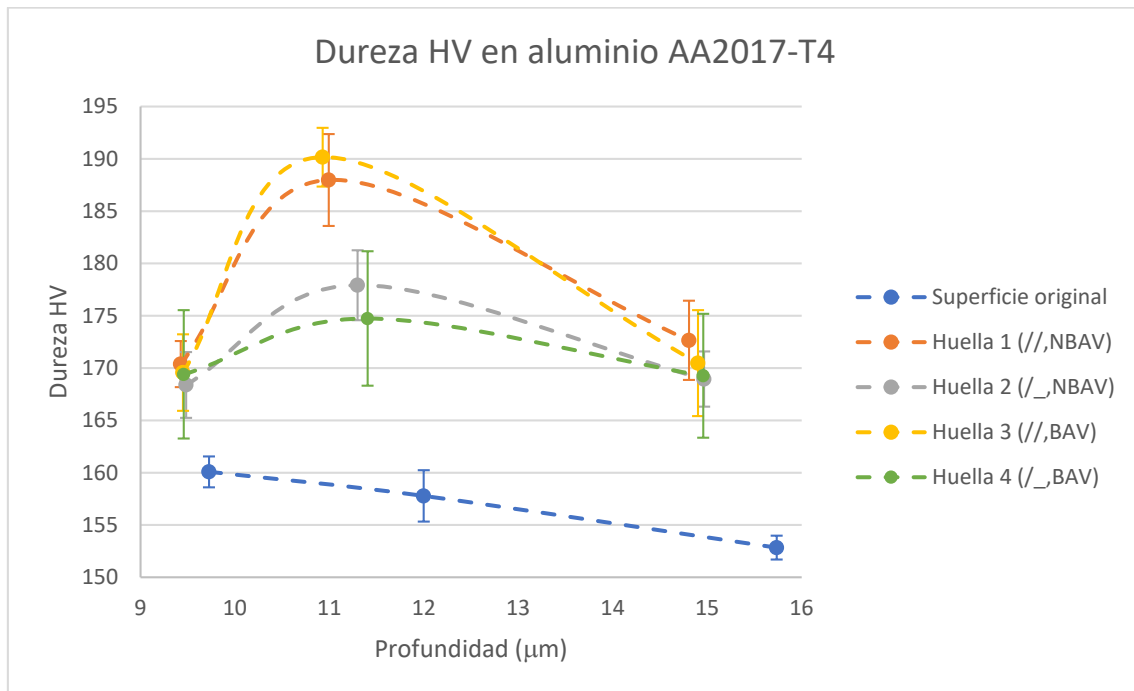


Figura 34. Comparativa de dureza Vickers entre las distintas huellas de bruñido en aluminio AA2017-T4

Los resultados determinados a partir del experimento muestran el notable efecto de la operación de bruñido sobre la dureza que presenta el material. Como era de esperar, en todas las huellas bruñidas se produce un endurecimiento del material con respecto

a la superficie inicial. La fuerza aplicada sobre la probeta provoca la deformación del material en frío, resultando en un incremento de los valores de dureza.

En cuanto a la profundidad de medida, se observa como para valores de dureza más bajos se alcanzan capas más interiores del material. La indentación marcada sobre la probeta se ve reducida a medida que la dureza Vickers aumenta debido a la resistencia que el material ofrece frente a la penetración.

Fijándose en las barras de error mostradas en el gráfico se observa la dispersión existente entre las diferentes muestras tomadas para unas mismas condiciones. La medición de la dureza depende de varios factores, pudiendo variar en gran medida dependiendo de la zona en la que se indente. Para el caso del aluminio AA2017-T4 se observa como el valor de dispersión de las muestras aumenta con respecto a las mediciones tomadas en la superficie original. Una posible explicación es el apilamiento de material durante la operación. La alta deformabilidad del aluminio provoca que se apile en ciertas zonas, donde la medida de dureza toma valores más reducidos si se compara con puntos en que no se produce este efecto.

Entrando en la discusión de las distintas variables del proceso se observa como la asistencia al proceso mediante vibraciones no produce ningún efecto sobre la dureza del material. De este modo, la asistencia al bruñido no resulta determinante en cuanto a valores de dureza durante su aplicación sobre piezas de aluminio AA2017-T4.

Finalmente, para el cambio en la dirección entre las distintas pasadas de material se observa una ligera influencia sobre el material en capas en torno a las 11 micras de profundidad. La aplicación del proceso mediante pasadas paralelas produce trabajo en frío sobre la misma zona en la misma dirección, por lo que el valor de dureza se ve incrementado. No obstante, el error entre las distintas muestras y el nulo efecto producido sobre capas contiguas no permiten obtener una evidencia clara del efecto de este parámetro sobre la dureza del aluminio.

## **4.3 Tensiones residuales**

El subcapítulo presentado aborda el cálculo de las tensiones residuales tras la aplicación del método del bruñido. El objetivo es establecer una comparativa entre la superficie original, con el fin de evaluar la magnitud de tensiones que este proceso induce sobre los materiales tratados.

Cabe decir que el método IHD implementado no es directo, sino que requiere de un cálculo posterior que permite determinar el estado tensional del material. Además, se trata de una técnica incremental: no se obtienen valores de tensión residual absolutos,

sino que el método se reduce a una comparativa entre estados tensionales a distintos puntos.

El perfil de tensiones residuales se distribuye desde un valor inicial en la superficie del material hasta un valor nulo en capas interiores de éste. El método implementado trata de determinar hasta qué profundidad se inducen tensiones tras bruñir la superficie de distintos materiales.

#### 4.3.1 Aplicación del método y cálculos

Tras el pegado de las galgas sobre el material de estudio y el conexionado con el aparato de medida se procede a taladrar la pieza. Inicialmente, las galgas extensiométricas muestran un valor de elongación nulo; a medida que se incide con la broca sobre la superficie, las galgas se deforman en función de la relajación experimentada por el material. Para el estudio se establece una frecuencia de muestreo de 50 Hz, por lo que el intervalo de tiempo entre dos muestras es de 0,02 segundos.

Mientras la broca mecaniza las galgas experimentan un pico de deformación debido a la presión de esta sobre el material. Por lo tanto, dichos valores se eliminarán de la muestra. Tal y como se observa en la siguiente figura, el valor de elongación parte de un valor nulo y va incrementando a medida que se incide sobre las capas más interiores del material, hasta llegar a cierta profundidad que las galgas se estabilizan y no se deforman. En este punto se establece que el valor de tensiones residuales es nulo.

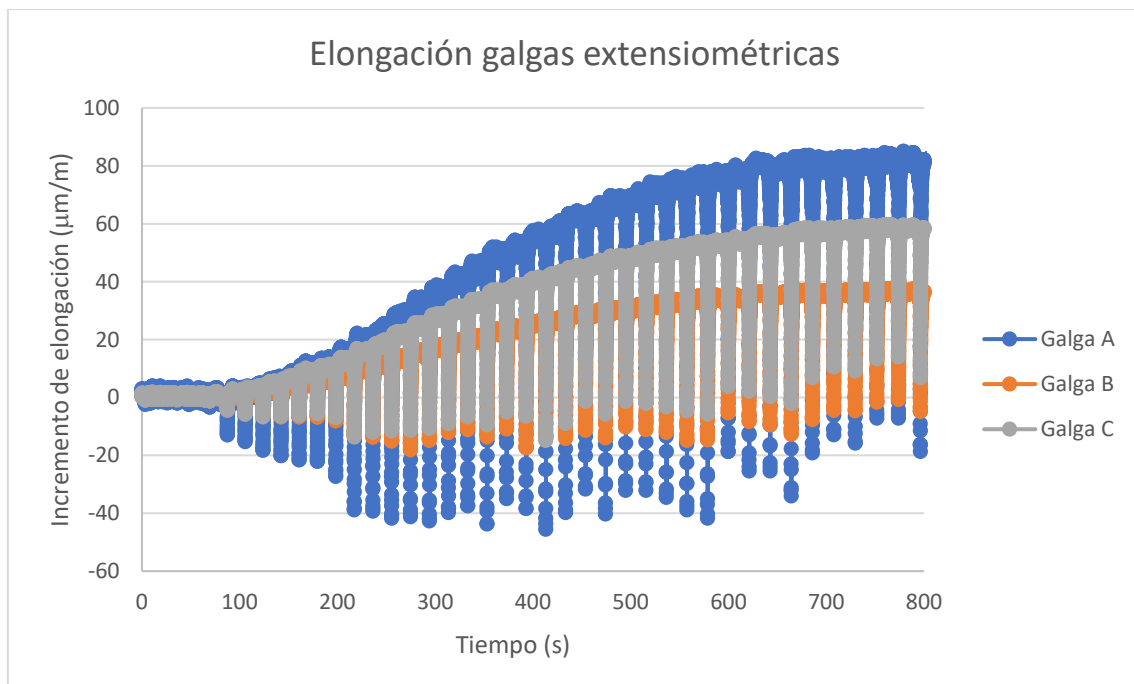


Figura 35. Ejemplo de medida del incremento de elongación en las galgas extensiométricas durante la aplicación del método IHD

A partir de los valores de elongación experimentados por cada una de las galgas se determina el valor de tensión aliviado en cada intervalo a partir de las expresiones anteriormente descritas. El siguiente paso consiste en eliminar los picos de tensión producidos por la presión de la broca sobre el material. De este modo, se obtiene una muestra de puntos para cada capa del material separada 0,05 mm respecto a la anterior, por lo que la escala de tiempo se pasa a valores de profundidad, obteniendo una gráfica como la que se muestra en la siguiente figura.

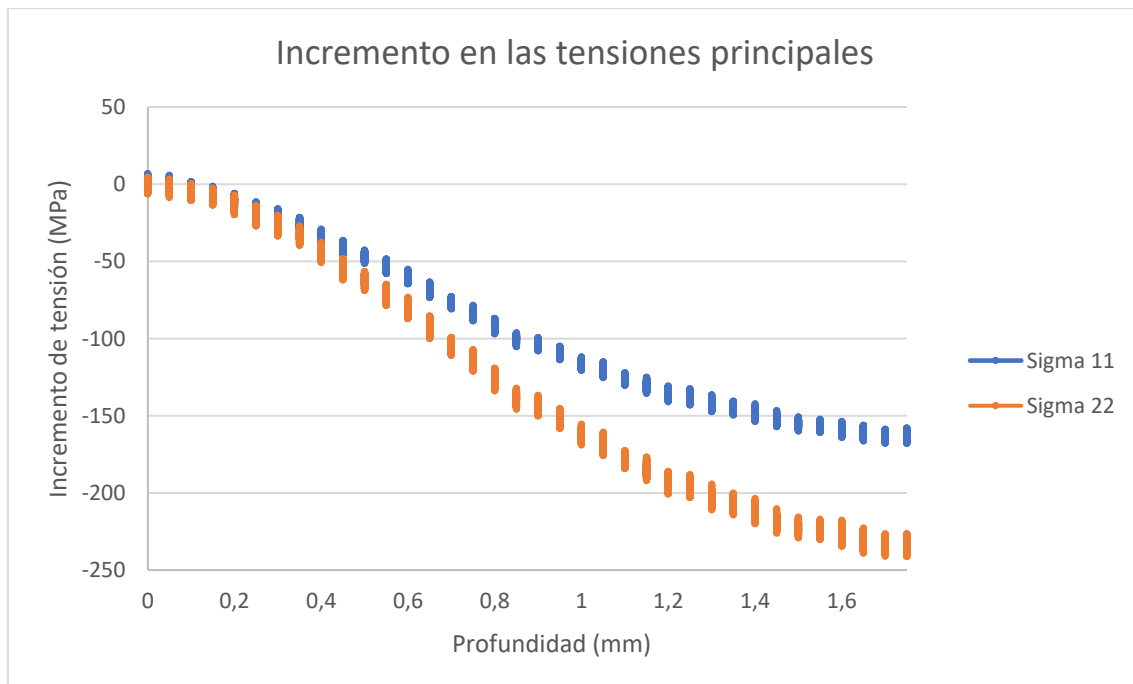


Figura 36. Ejemplo del incremento en las tensiones residuales principales en función de la profundidad

Como se ha comentado, las tensiones residuales principales parten de un valor cero en la superficie del material, incrementándose a medida que aumenta la profundidad, hasta llegar a estabilizarse. Cabe decir que el signo negativo de las tensiones es debido al carácter compresivo que presentan.

Finalmente, se calcula el parámetro de tensión equivalente de Von Mises como descriptor total de la superficie. Igual que para el caso de las tensiones principales, se obtiene una nube de valores para cada una de las profundidades estudiadas. De este modo se calcula el valor medio de la tensión equivalente para cada cota del material, por lo que resulta necesario determinar la desviación típica introducida en el cálculo de la media.

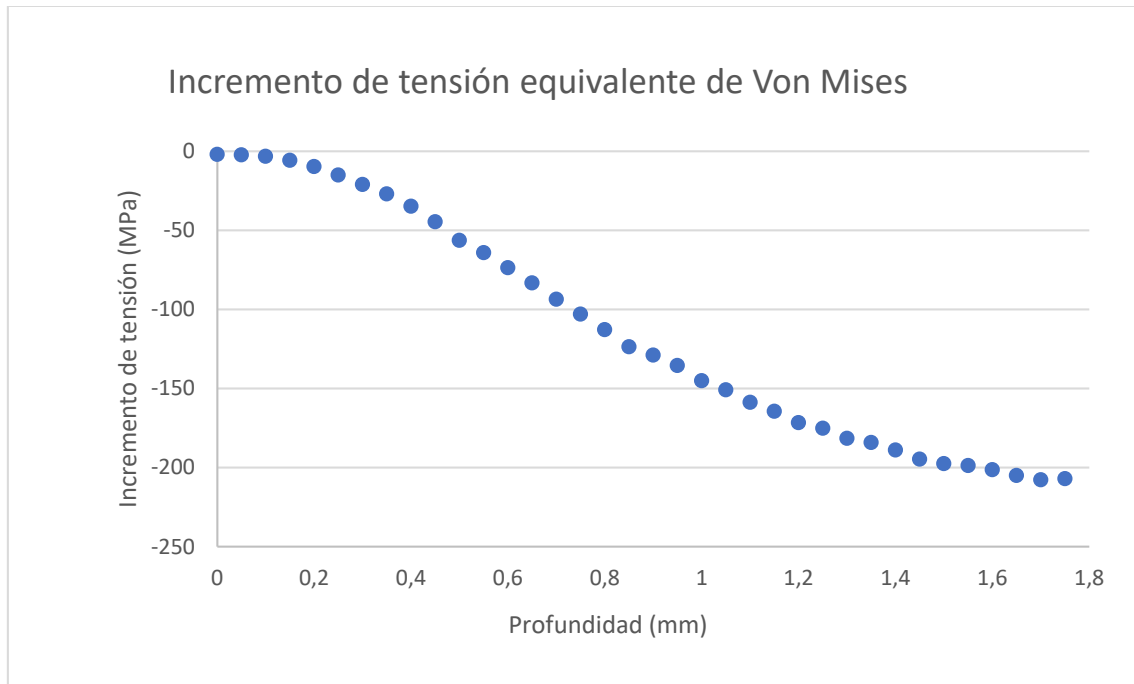


Figura 37. Ejemplo del incremento en la tensión equivalente de Von Mises en función de la profundidad

Siguiendo el procedimiento detallado se analiza el perfil de tensiones residuales existente en el acero AISI1038 y el aluminio AA2017-T4, con el fin de establecer cuál es el efecto que produce la aplicación del bruñido sobre distintos materiales.

#### 4.3.2 Acero AISI1038

El estudio de las tensiones residuales en el acero AISI1038 resulta interesante debido a su amplia aplicación industrial. El fallo producido por fatiga en componentes de acero es frecuente, por lo que el bruñido podría postularse como un proceso capaz de paliar este efecto. La búsqueda de los parámetros del proceso más adecuados para tal fin es el punto de partida de la presente experimentación.

Además de cuantificar el valor de las tensiones residuales compresivas inducidas por el proceso de bruñido resulta interesante estudiar si existe algún efecto del proceso sobre la dirección principal de la tensión. Como se ha demostrado en la caracterización de la topología superficial, el bruñido deforma por completo la superficie original, por lo que se plantea la hipótesis de que se incida sobre la dirección principal del estado tensional. Para ello, el estudio parte del estudio de la elongación experimentada por cada una de las galgas extensiométricas. De este modo, se grafica la deformación de las galgas para cada una de las huellas de bruñido, comparándola con los valores en la zona mecanizada (los gráficos para las tensiones residuales se muestran en el Anexo 7 del documento).

En las cuatro huellas bruñidas se produce un incremento en la elongación experimentada por las tres galgas de la roseta si se compara con los valores de deformación en la zona mecanizada. Tal y como se muestra en las expresiones anteriores, la tensión es proporcional a la elongación experimentada por las galgas, por lo que se establece que la operación de bruñido induce tensiones residuales sobre el acero AISI1038. No obstante, la dirección entre las distintas pasadas influye directamente sobre la dirección en la cual se distribuyen mayormente las tensiones.

Aunque para ambas estrategias de bruñido el valor de elongación de la galga A (perpendicular a las líneas de mecanizado) predomina sobre las otras dos, existe una pequeña influencia sobre la galga C (paralela a las líneas de mecanizado). Por una parte, la aplicación del proceso mediante pasadas paralelas entre ellas produce una mayor elongación sobre la galga C. Por otra parte, alternar la dirección entre las distintas pasadas produce una deformación por igual en las galgas B y C. De este modo, se establece que bruñir la superficie en una misma dirección para todas las pasadas incide en mayor medida sobre las tensiones en una de las direcciones. Observando las gráficas de las tensiones principales en las dos direcciones del espacio se observa como el efecto producido sobre la galga A resulta en el predominio de la tensión residual en una de las direcciones principales para todas las huellas bruñidas.

Seguidamente se calcula el incremento en la tensión equivalente de Von Mises a partir de los valores de las tensiones en cada una de las direcciones principales. Una vez obtenido el valor medio para cada profundidad se grafican para cada una de las huellas bruñidas.

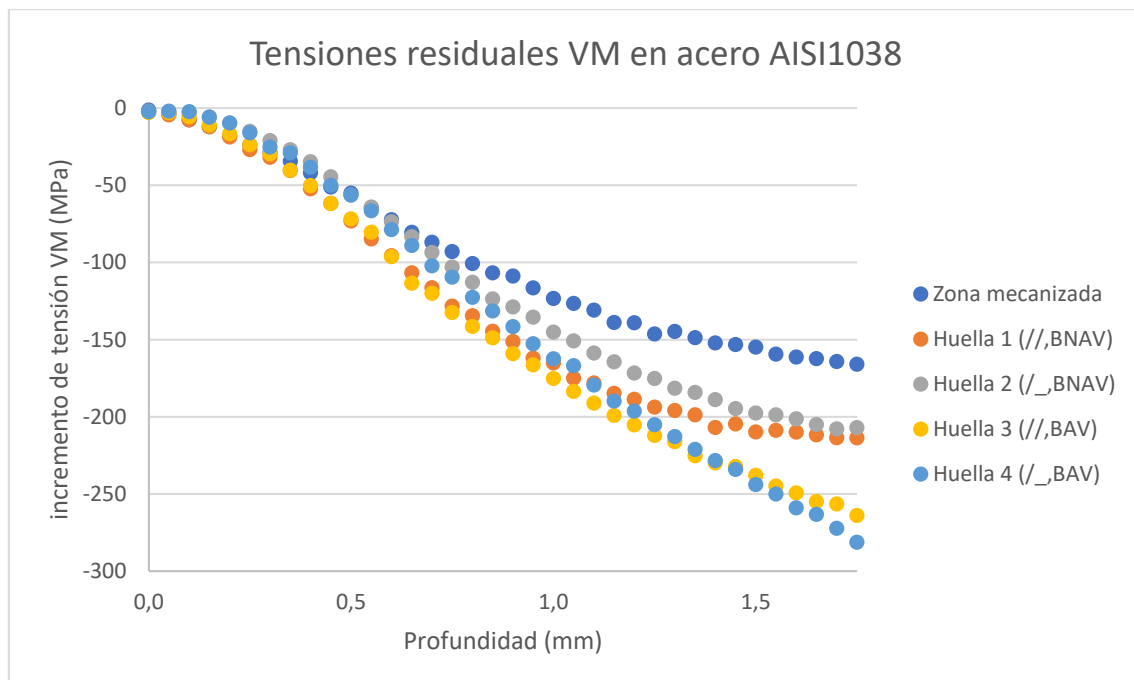


Figura 38. Comparativa del incremento en la tensión residual equivalente VM para cada una de las huellas de bruñido en acero AISI1038



A partir de la gráfica anterior se puede observar la clara influencia de la aplicación de bruñido sobre las tensiones residuales compresivas en el acero AISI1038. Para las cuatro huellas se observa como el valor del incremento en el estado tensional es superior al que presenta la superficie original mecanizada.

Entrando en la discusión de los efectos producidos por un cambio en la dirección de las distintas pasadas de bruñido se puede observar semejanza entre la variación del estado tensional de las huellas 1 y 2. De igual forma, las curvas correspondientes a las huellas 3 y 4 también se asemejan. Teniendo en cuenta que entre ellas varía únicamente la dirección entre las pasadas de bruñido, se concluye que la variación de dicho parámetro no produce un efecto significativo sobre el estado tensional del material.

En cuanto a la asistencia al proceso mediante vibraciones ultrasónicas se observa una clara influencia sobre el estado tensional. Por una parte, la aplicación del proceso convencional (huellas 1 y 2) induce tensiones compresivas de 50 MPa por encima de las que presenta la superficie original. Por la otra, las zonas bruñidas aplicando vibraciones (huellas 3 y 4) presentan tensiones de hasta 100 MPa por encima de la superficie mecanizada. Por lo tanto, se puede concluir que la asistencia mediante vibraciones duplica el valor de las tensiones residuales compresivas inducidas sobre el acero estudiado.

En torno a la profundidad hasta la cual se presentan tensiones compresivas, el mecanizado del acero AISI1038 con las condiciones citadas anteriormente induce provoca una influencia en el estado tensional hasta 1,4 mm de profundidad, donde se estabilizan los valores de elongación de las galgas y, por lo tanto, el valor de la tensión residual es nula. Para las zonas bruñidas a partir del método convencional, aunque el valor absoluto de la tensión aumenta, la profundidad hasta la cual se observa el efecto del proceso no varía respecto al mecanizado original. En cambio, la introducción de vibraciones al proceso permite incidir sobre el estado tensional del material a profundidades más elevadas.

Tal y como se observa en la gráfica anterior para las huellas 3 y 4 el valor del incremento en el estado tensional no llega a estabilizarse dentro del intervalo de profundidad estudiado. Esto refleja que en el punto de profundidad máxima de 1,75 mm el valor de la tensión adquiere un valor distinto de cero y, en consecuencia, la profundidad hasta la cual influye el bruñido asistido mediante vibraciones aumenta respecto al proceso convencional.

A partir de la conclusión anterior se decide realizar un nuevo experimento aumentando la profundidad de estudio hasta el máximo permitido por la norma con el fin de determinar hasta qué profundidad se inducen tensiones compresivas en el acero AISI1038. Debido a la frecuencia de muestreo y las limitaciones del equipo de adquisición de datos se reduce el tiempo de estabilización entre taladros consecutivos a 5 segundos.

#### 4.3.2.1 Tensiones residuales en acero AISI1038 a mayor profundidad

El experimento planteado contempla dos nuevas huellas, ambas bruñidas mediante la asistencia de vibraciones. Mientras que en una se decide realizar pasadas de bruñido paralelas entre ellas, la dirección entre las pasadas de bruñido consecutivas para la otra se establece como perpendicular. Realizada la experimentación se grafica el perfil de tensiones de Von Mises en función de la profundidad.

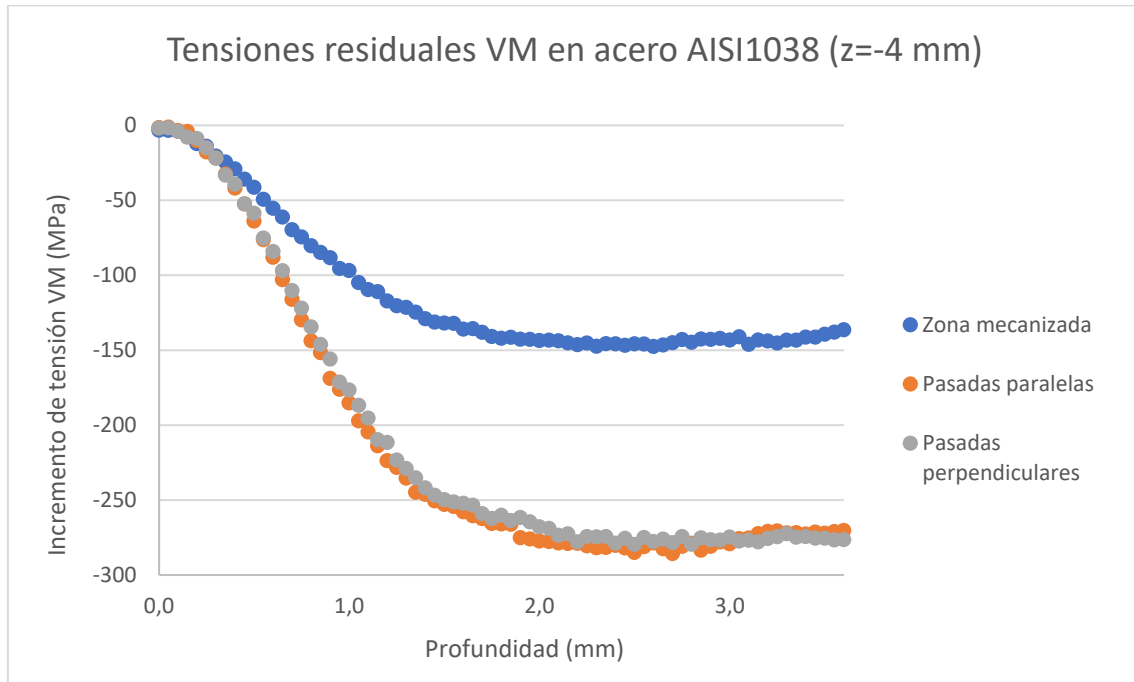


Figura 39. Comparativa del incremento en las tensiones residuales compresivas en acero AISI1038 para mayor profundidad

La gráfica anterior muestra como el valor de las tensiones residuales se estabiliza a mayor profundidad cuando se aplica bruñido asistido mediante vibraciones sobre la superficie. El experimento realizado reafirma que una variación en la dirección del bruñido no produce ningún efecto, mientras que la introducción de vibraciones al proceso induce tensiones hasta profundidades de 2,3 mm en el acero AISI1038.

En resumen, del experimento realizado en torno al acero se extraen las siguientes conclusiones:

- La técnica del bruñido induce tensiones residuales compresivas en el acero AISI1038 de hasta 100 MPa mayores que la superficie original.
- No existe una clara influencia en cuanto a la variación de la dirección entre las diferentes pasadas de bruñido.

- La introducción de vibraciones al proceso duplica los valores de tensión residual obtenidos mediante la técnica convencional. Además, la profundidad a la que incide el bruñido asistido aumenta hasta los 2,3 mm.

### ***4.3.3 Aluminio AA2017-T4***

El estudio de las tensiones residuales compresivas sobre el aluminio AA2017-T4 cobra vital importancia debido a la escasa bibliografía en torno a la caracterización de este material. No obstante, y debido a la creciente utilización del material en la industria, resulta interesante caracterizar el aluminio en cuanto a tensiones internas se refiere tras ser tratado mediante la técnica del bruñido.

La experimentación realizada en torno al aluminio se ve influenciada por la alta deformabilidad del material. Las galgas extensiométricas evalúan pequeñas deformaciones a nivel de micrométrico, por lo que en algunos casos el experimento se ve afectado hasta el punto de fallar la adquisición. A su vez, el proceso de tratamiento de los datos adquiridos se ve afectado por puntos aberrantes en la muestra.

El estudio parte de la evaluación de la elongación experimentada por cada una de las galgas en las distintas huellas de bruñido, con el fin de evaluar el efecto del bruñido sobre la dirección en la distribución de tensiones del material. Por lo tanto, se grafican los valores de elongación experimentados durante la aplicación del método IHD (las gráficas de las elongaciones experimentadas por las galgas se muestran en el Anexo 7).

A partir de los datos adquiridos se observa como todas las galgas localizadas sobre las huellas bruñidas experimentan una mayor elongación si se compara con el valor de ésta sobre la superficie original mecanizada. De este modo, se deduce que el proceso de bruñido induce tensiones residuales compresivas de mayor valor tal y como se demuestra más adelante.

En cuanto al análisis de la elongación para cada una de las galgas se observa como la designada como A (perpendicular a las líneas de mecanizado) experimenta una mayor elongación si se compara con las galgas B (oblicua a las líneas de mecanizado) y C (paralela a las líneas de mecanizado) para todas las huellas de bruñido excepto la 3. En cuanto a la elongación de las galgas B y C, existe una semejanza en las curvas de la deformación para las huellas bruñidas, excepto en la huella 4 en la que la elongación experimentada por la galga paralela al mecanizado es superior a la mostrada por la oblicua. A raíz de tal efecto se establece que la variación en la dirección de las distintas pasadas de bruñido no produce ningún efecto en cuanto a la orientación de las tensiones residuales en el material. No obstante, la asistencia mediante vibraciones al proceso produce cambios en la dirección tensional afectada.

El siguiente paso es analizar el incremento producido sobre los niveles de tensión residual equivalente en función de la profundidad a partir de los valores en las direcciones principales. De este modo se establece una comparativa entre las cuatro huellas de bruñido y la superficie original.

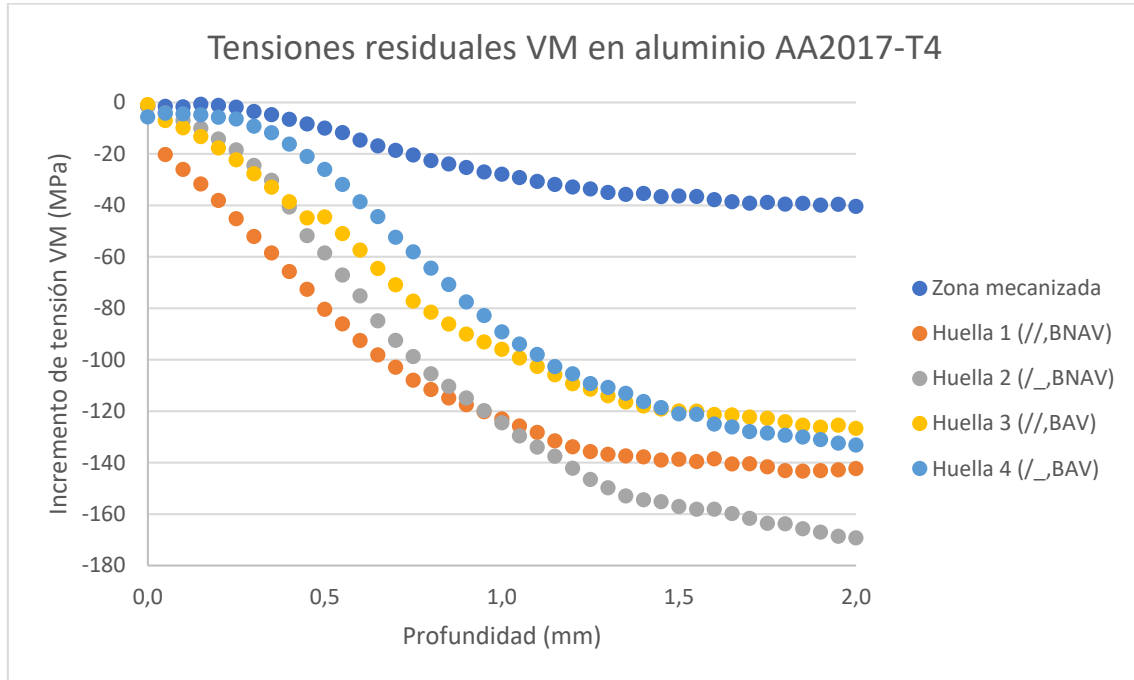


Figura 40. Comparativa del incremento en la tensión residual equivalente VM para cada una de las huellas de bruñido en aluminio AA2017-T4

La gráfica comparativa mostrada muestra la notable influencia que genera el bruñido de superficies de aluminio AA2017-T4 sobre las tensiones residuales compresivas. En todas las zonas bruñidas se observa la incidencia del bruñido sobre el estado tensional del material tratado.

Entrando en la discusión de los parámetros variados durante el bruñido se analiza el efecto producido por un cambio de dirección entre pasadas consecutivas. A nivel de valor tensional absoluto, la aplicación del proceso mediante pasadas paralelas o perpendiculares entre ellas no evidencia ningún efecto. No obstante, si se observan las curvas de las huellas 1 y 3 (pasadas paralelas) muestran una misma tendencia. De igual forma, las huellas 2 y 4 (pasadas perpendiculares) dibujan tendencias similares en la distribución del estado tensional. De este modo, se concluye que la operación de bruñido con varias pasadas paralelas entre sí induce tensiones de mayor valor a capas del material próximas a la superficie, mientras que la aplicación del proceso con varias pasadas perpendiculares entre sí resulta en valores de tensión residual mayores en capas más profundas del material.

Para la asistencia mediante vibraciones si se observa una influencia clara sobre el estado tensional. Las curvas muestran como las huellas bruñidas aplicando el proceso

convencional inducen tensiones de 100 MPa por encima del estado tensional de la superficie original. En cambio, las zonas bruñidas con la asistencia de vibraciones reducen el nivel de tensiones residuales alcanzado a 80 MPa por encima de la superficie mecanizada.

Combinando ambos parámetros se puede llegar hasta valores de tensión residual elevados. Es el caso de la huella 2, en la que el bruñido de la superficie aplicando el método convencional y realizando varias pasadas perpendiculares entre ellas se obtienen valores de hasta 130 MPa por encima del original.

En cuanto a la profundidad a la cual se estabiliza la curva, es decir, en el cual los valores de tensiones residuales compresivas son nulos se observa una influencia en la dirección de las pasadas. Por una parte, la aplicación de distintas pasadas paralelas no induce tensiones más allá de la profundidad a la que se presentan en la superficie original, es decir, en 1,4 mm. Por otra parte, varias pasadas de bruñido perpendiculares incrementan el valor de profundidad sobre el cual se incide hasta los 2 mm.

En resumen, del experimento realizado en torno al aluminio se extraen las siguientes conclusiones:

- La técnica del bruñido induce tensiones residuales compresivas en el aluminio AA2017-T4 de hasta 130 MPa mayores que la superficie original.
- La variación de la estrategia entre las distintas pasadas modifica la profundidad a la cual las tensiones residuales se ven afectadas; además, la aplicación de distintas pasadas de bruñido perpendiculares entre sí aumenta la profundidad en la que las tensiones se ven afectadas hasta los 2 mm.
- La introducción de vibraciones al proceso reduce los valores de tensión residual inducida en 20 MPa respecto a la técnica convencional.

#### ***4.3.4 Comparativa de los resultados entre los materiales***

Tras realizar la experimentación con el acero AISI1038 y el aluminio AA2017-T4 se establece una comparativa entre el efecto producido por el bruñido sobre las tensiones residuales compresivas en cada uno de los materiales. Tal y como se ha observado, el efecto de esta técnica de acabado no depende únicamente de los parámetros seleccionados para la aplicación del proceso, sino que el material tratado también influye en los resultados obtenidos.

A partir de la evaluación de tensiones por el método del IHD se extraen las siguientes conclusiones:

- La aplicación de la técnica de bruñido sobre la superficie de ambos materiales provoca cambios en el estado de las tensiones residuales compresivas en cuanto a dirección, profundidad y valor absoluto.
- Para la dirección en la cual la tensión residual se ve afectada en ambos materiales se establece que en la dirección perpendicular a las líneas de mecanizado las tensiones inducidas son mayores. No obstante, el valor se incrementa en todas las direcciones estudiadas.
- A nivel de valores de tensión, la deformación experimentada por las galgas refleja que en el acero se alcanzan valores más elevados si se compara con el aluminio. No obstante, si se observa el valor inducido por el bruñido se observa que en ambos materiales son de magnitud similar, en torno a 100 MPa por encima del valor original. Aun así, el aluminio adopta tensiones residuales de mayor valor a capas menos profundas del material si se compara con el acero.
- Comparando las tensiones principales en las dos direcciones del espacio se observa que en todos los casos experimentados una de las direcciones predomina debido a la mayor elongación mostrada por la galga A, orientada perpendicular a las líneas de mecanizado. De esta forma, un cambio en la dirección del mecanizado induce una variación en la dirección principal predominante en ambos materiales.
- En cuanto a la profundidad a la cual el bruñido modifica el estado tensional del material varía en función del material tratado. Por una parte, en el acero AISI1038 la técnica induce tensiones residuales hasta una profundidad de 2,3 mm. Por otra parte, el aluminio AA2017-T4 tratado con la técnica del bruñido presenta tensiones hasta profundidades de 2mm. De este modo, las tensiones sobre el acero se inducen a mayor profundidad.
- Por lo que a la asistencia mediante vibraciones al proceso de bruñido se refiere, ambos materiales responden de forma diferente. El acero AISI1038 tensiones residuales de mayor valor y a mayores profundidades si es tratado con la técnica asistida. En cuanto al aluminio AA2017-T4 se produce el efecto contrario, por lo que la aplicación de la técnica convencional induce valores más elevados de tensión a mayor profundidad.
- Respecto a la estrategia adoptada entre las distintas pasadas, para el caso del acero un cambio en la dirección del bruñido no introduce cambios sustanciales sobre el resultado final. Por el contrario, para el caso del aluminio la estrategia seleccionada para el bruñido es determinante en el resultado final.

## 5. Conclusiones

El trabajo presentado se ha desarrollado con el objetivo de caracterizar el acero AISI1038 y el aluminio AA2017-T4 en cuanto a topología superficial, dureza y tensiones residuales se refiere, tras la aplicación de la de bruñido con bola utilizando distintas variables durante el proceso.

El proyecto surgía a partir de dos líneas de investigación que han definido los diferentes puntos tratados a lo largo del estudio. Por una parte, la asistencia de vibraciones ultrasónicas al bruñido se postulaba como uno de los puntos más ambiciosos por tratarse de un tema poco referenciado hasta la actualidad. Por otra parte, la innovación del experimento se centraba en la utilización de la técnica del taladro incremental como método de caracterización de las tensiones residuales. La combinación de ambas vertientes permitiría experimentar con los materiales anteriormente citados.

Durante el transcurso del trabajo han surgido constantes imprevistos que a su vez han encaminado su desarrollo. La obtención de ciertos resultados fuera de lo previsto ha permitido añadir puntos al estudio, dotando al trabajo de mayor atractivo.

El principal fin perseguido desde el inicio trataba de optimizar los parámetros estudiados para la operación de bruñido. Como se ha podido observar, la aplicación de esta técnica no puede generalizarse, ya que su implementación sobre distintos materiales conduce a resultados que divergen entre sí.

Por una parte, el tratamiento mediante bruñido sobre el acero ha evidenciado la validez de estudios previos alrededor de este material. Las notables mejoras en topología superficial y tensiones residuales compresivas postulan el bruñido como técnica óptima para el tratamiento del acero. Más aún, se debe hacer hincapié en una de las principales conclusiones de este trabajo. A raíz de las mediciones del estado tensional se ha podido evidenciar el efecto de las vibraciones sobre la profundidad afectada. Por este motivo, la asistencia a este proceso cobra vital importancia en la inducción de tensiones residuales a elevadas profundidades sobre este material, por lo que la técnica se postula como una posible solución en la paliación de los fallos por fatiga, además de reducir notablemente el desgaste por fricción entre piezas.

Por otra parte, la aplicación del bruñido sobre el aluminio muestra resultados contundentes e innovadores debido a la escasa bibliografía en torno al material. No obstante, se puede concluir los resultados que la asistencia con vibraciones induce sobre el AA2017-T4 no muestran una perspectiva de aplicación sobre éste. Aun así, la técnica del bruñido sobre el material produce mejoras de las características evaluadas.

Para finalizar se debe hacer especial referencia a la técnica de medición de tensiones residuales empleada en este experimento. Los resultados en torno a la aplicación de esta técnica evidencian su validez en la caracterización del estado tensional a nivel incremental. No obstante, se plantean ciertas limitaciones de esta técnica a partir de los resultados. A partir de esto, se presentan nuevos horizontes a investigar en torno a la aplicación de este método tan innovador.



## 6. Prospectiva y trabajos futuros

El presente proyecto se engloba dentro de las experimentaciones llevadas a cabo dentro del grupo DEFAM (Grup de Desenvolupament en Fabricació i Materials). En éste se desarrollan proyectos en torno a la caracterización de materiales tras la aplicación de distintos procesos de fabricación, como es el caso del trabajo presentado en este documento.

La aplicación de la operación del bruñido sobre superficies metálicas ha sido durante años la principal línea de investigación del grupo, junto con el campo de la impresión 3D. Por lo que a la primera se refiere, son numerosos los experimentos realizados en torno a la caracterización del proceso. Artículos científicos, tesis doctorales y patentes de herramientas de bruñido avalan el trabajo realizado en torno a esta técnica.

La experimentación desarrollada se presenta como una continuación del trabajo realizado por Jerez-Mesa (codirector del presente proyecto) en su tesis doctoral, en la que se caracterizan dos materiales (acero y titanio) tras aplicarles el proceso de bruñido con diferentes parámetros de estudio. Además, su trabajo desarrolla una nueva herramienta de bruñido asistida por vibraciones ultrasónicas.

La innovación del presente estudio gira en torno a la caracterización de las tensiones residuales inducidas por la técnica mencionada. Hasta el momento, la evaluación de este parámetro únicamente se había realizado en la tesis anteriormente citada. No obstante, se utilizaba la difracción de rayos X como técnica de medición, por lo que se justifica la innovación de la experimentación realizada.

La aplicación de la técnica IHD, y en especial como método de medición de tensiones residuales tras el bruñido, se encuentra en vías de investigación debido a su reciente aparición en el campo de la investigación. De este modo, el proyecto realizado se postula como punto de partida para la experimentación de esta técnica, siendo numerosas las líneas de investigación que se podrían plantear en torno al trabajo presentado.

A nivel industrial surgen nuevos materiales a diario que buscan ofrecer ciertas prestaciones frente a diversas aplicaciones. En torno a esto, el trabajo se podría repetir sobre distintos materiales con el fin de establecer una comparativa de los efectos producidos por el bruñido sobre éstos.

Tal y como se ha comentado durante el trabajo, el método se caracteriza por la determinación de las tensiones de forma incremental. No obstante, la determinación de éstas de forma absoluta queda fuera del alcance del método, por lo que la combinación

de esta técnica con la difracción de rayos X podrían completar los resultados presentados.

Finalmente, la novedad del método implica que el proceso de tratamiento de datos sea costoso. Por lo tanto, se plantea estudiar la posibilidad de automatizar el proceso.

## 7. Bibliografía

- [1] Araque, O.J, Arzola, N. *State of the art in structural integrity of welded joints and crack models for structures life management*. Revista Chilena de Ingeniería 21, 2 (2013), 279-292.]
- [2] Bouzid, W., Tsoumarev, O., Sai, K. *An investigation of surface roughness of burnished AISI 1042 steel*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 24, 1-2 (2004), 120-125.
- [3] De Chiffre, L., Lonardo, P., Trumpold, H., Lucca, D., Goch, G., Brown, C., Raja, J., Hansen, H. N. *Quantitative characterisation of surface texture*. CIRP annals-manufacturing technology 49, 2 (2000), 644-652.
- [4] El-Khabeery, M.M., El-Axir, M.H. *Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity*. The international Journal of Machine Tools and Manufacture 41, 12 (2001), 1705-1719.
- [5] Fang-Jung, S., Chien-Hua, C. *Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process*. Materials Science Forum (2006), 505-507.
- [6] Garcia-Granada, A. A., Smith, D. J., Pavier, M.J. *A new procedure based on Sach's boring for measuring non-axisymmetric residual stresses*. International Journal of Mechanical Sciences 42, 6 (2000), 1027-1047.
- [7] Garcia-Granada, A. A., Smith, D. J., Pavier, M.J. *A new procedure based on Sach's boring for measuring non-axisymmetric residual stresses: experimental application*. International Journal of Mechanical Sciences 43, 12 (2001), 2753-2768.
- [8] Garcia-Granada, A.A., Gómez-Gras, G., Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodríguez, J.A., Reyes, G. *Ball-burnishing effect on deep residual stress on AISI 1038 and AA2017-T4*. Materials and Manufacturing Processes, 2017.
- [9] Gharbi, F., Sghaier, S., Al-Fadhalah, K., Benameur, T. *Effect of ball burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates*. Journal of Materials Engineering and Performance 20, 6 (2011), 903-910.
- [10] Gómez-Gras, G. *Estudio del proceso de bruñido con bola asistido por una vibración*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.

- [11] Hamadache, H., Laouar, L., Zeghib, N.E., Chaoui, K. *Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing*. Journal of Materials Processing Technology 180, 1 (2006), 130-136.
- [12] Hamadache, H., Laouar, L., Zeghib, N., Chaoui, K. *Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing*. Journal of Materials Processing Technology 180, 1 (2006), 130-136.
- [13] Hariharan, K., Prakash, R.V. *Integrating effect of forming in fatigue life prediction: review of present scenario and challenges*. Journal of Engineering Manufacture 226 (2012).
- [14] Hassan, H., Al-Jalil, H., Ebied, A. *Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components*. Journal of Materials Processing Technology 83,1 (1998), 176-179.
- [15] Hassan, A. M., Momani, A.M. *Further improvements in some properties of shoot peened components using the burnishing process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 40, 12 (2000), 1775-1786.
- [16] Hassan, A.M., Al-Bsharat, A. S. *Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process*. Journal of Materials Processing Technology 72, 3 (1997), 385-391.
- [17] Hassan, A. M., Al-Bsharat, A.S. *Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals*. Wear 199, 1 (1996), 1-8.
- [18] Hassan, A.M. *The effects of ball – and roller – burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals*. Journal of Materials Processing Technology 72, 3 (1997), 385-391.
- [19] Hassan, A.M., Maqableh, A.M. *The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components*. Journal of Materials Processing Technology 102, 1 (2000), 115-121.
- [20] Hoffman, K. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt, Alemania: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (1989).
- [21] Izumi, O., Oyama, K., Suzuki, Y. *On the superimposing of ultrasonic vibration during compressive deformation of metals*. Transactions of the Japan Institute of Metals 7,3 (1966), 158-161.

- [22] Jerez-Mesa, R. *Study and characterisation of surface integrity modification after ultrasonic vibration-assisted ball burnishing*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [23] Loh, N., Tam, S., Miyazawa, S. *Surface hardening by ball burnishing*. Tribology International 23, 6 (1990), 413-417.
- [24] Maawad, E., Brokmeier, H.G., Hofmann, M., Genzel, C., Wagner, L. *Stress distribution in mechanically surface treated Ti-2.5Cu determined by combining energy-dispersive synchrotron and neutron diffraction*. Materials Science and Engineering 527, 21-22 (2010), 5745-5749.
- [25] Mahmood, A. *The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals*. Journal of Materials Processing Technology 72, 3 (1997), 385-391.
- [26] Majzoobi, G., Azadikhah, K., Nemati, J. *The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6*. Materials Science and Engineering 516, 1 (2009), 235-247.
- [27] Mathar, J. *Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes*. Transactions of American Society of Mechanical Engineers, 1934.
- [28] Murthy, R., Kotiveerachari, B. *Busnishing of metallic surfaces – a review*. Precision Engineering 3, 3 (1981), 172-179.
- [29] Nalla, R.K, Altenberger, I., Noster, U., Liu, G.Y., Scholtes, B., Ritchie, R.O. *On the influence of mechanical surface treatments – deep rolling and laser shock peening – on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures*. Materials Science and Engineering 355, 1-2 (2003), 216-230.
- [30] Némat, M., Lyons, A. *An investigation of the surface topography of ball burnished mild steel and aluminium*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 16, 7 (2000), 469-473.
- [31] Rodríguez, A., López de La Calle, L. N., Celaya, A., Lamikiz, A., Albizuri, J. *Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique*. Surface and Coatings Technology 206, 11 (2012), 2817-2824.
- [32] Sagbas, A. *Analysis and optimization of surface roughness in the ball burnishing process using response surface methodology and desirability function*. Advances in Engineering Software 42, 11 (2011), 992-998.
- [33] Shepard, M. J., Prevéy, P.S., Jayaraman, N. *Effects of surface treatment on fretting fatigue performance of Ti-6Al-4V*. Tech. rep., DTIC Document, 2004.

- [34] Shiou, F.J., Chen, C.H. *Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball burnishing process*. Journal of Materials Processing Technology 140, 1 (2003), 248-254.
- [35] Shiou, F.J., Chuang, C.H. *Precision surface finish of the mold steel PDS5 using and an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell*. Precision Engineering 34, 1 (2010), 76-84.
- [36] Siu, K.W., Ngan, A., Jones, I. *New insight on acoustoplasticity - ultrasonic irradiation enhances subgrain formation during deformation*. International Journal of Plasticity 27, 5 (2011), 788-800.
- [37] Travieso-Rodriguez, J.A., Gómez-Gras, G., Jorba Peiró, J., Carrillo, F., Dessein, G., Alexis, J., González-Rojas, H.A. *Experimental study on the mechanical effects of the vibration-assisted ball-burnishing process*. Materials and Manufacturing Processes 30, 12 (2015), 1490-1497.
- [38] Travieso-Rodriguez, J.A. *Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)*. Phd thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [39] Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. *Residual stress. Part 1 – Measurement techniques*. Materials Science and Technology 17, 4 (2001), 355-365.

## Anexo 1. Presupuesto

En el presente anexo se detalla el presupuesto económico del proyecto, en el que se incluyen los recursos materiales y técnicos empleados, así como los recursos humanos de ingeniería y fabricación.

Con el fin de analizar la vertiente económica del experimento se ha dividido la contabilidad en cinco partidas presupuestarias que, a su vez, se corresponden con las principales tareas en las que se ha organizado el proyecto. De este modo, se definen las siguientes partidas:

- Estudio del método y diseño del ensayo (partida 1).
- Preparación de la instrumentación y maquinaria necesarias (partida 2).
- Fabricación de las probetas a experimentar (partida 3).
- Experimentación (partida 4).
- Tratamiento de datos, validación de resultados y discusión (partida 5).

Los costes mostrados en el presente capítulo se han calculado con el impuesto incluido en el precio.

Además, se ha calculado una partida donde se consideran los gastos materiales empleados durante la ejecución del proyecto (partida 6). También los gastos energéticos y de mantenimiento se contemplan en las partidas correspondientes de maquinaria.

<i>Tarea</i>	<i>Recursos</i>	<i>Horas</i>	<i>Precio (€/h)</i>	<i>Coste (€)</i>
<b>Estudio del método</b>	Ingeniería	10	25,00	250,00
	Hardware	10	2,00	20,00
<b>Selección de materiales y parámetros</b>	Ingeniería	5	25,00	125,00
<b>Planificación del estudio</b>	Ingeniería	4	25,00	100,00
<b>SUBTOTAL</b>				495,00

Tabla 14. Partida presupuestaria 1

<b>Tarea</b>	<b>Recursos</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio (€/h)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Generación códigos CNC</b>	Ingeniería	2	25,00	50,00
<b>Calibración herramienta de bruñido</b>	Ingeniería	0,5	25,00	12,50
	Maquinaria	0,5	5,00	2,50
	Instrumentación	0,5	5,00	2,50
<b>Cableado equipo extensimetría</b>	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
	Ingeniería	4	25,00	100,00
	Instrumentación	4	3,00	12,00
<b>Preparación Software extensimetría</b>	Ingeniería	0,5	25,00	12,50
	Instrumentación	0,5	3,00	1,50
<b>SUBTOTAL</b>				193,50

Tabla 15. Partida presupuestaria 2

<b>Tarea</b>	<b>Recursos</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio (€/h)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Corte de las probetas</b>	Maquinaria	0,5	3,00	1,50
	Técnico taller	0,5	20,00	10,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>Taladros</b>	Maquinaria	0,5	4,00	2,00
	Técnico taller	0,5	20,00	10,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>Planeado CNC</b>	Maquinaria	1	10,00	10,00
	Técnico taller	1	40,00	40,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>Fresado hemisférico CNC</b>	Maquinaria	2	10,00	20,00
	Técnico taller	2	40,00	80,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>Bruñido CNC</b>	Maquinaria	3	10,00	30,00
	Ingeniería	3	25,00	75,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>SUBTOTAL</b>				278,50

Tabla 16. Partida presupuestaria 3



<b>Tarea</b>	<b>Recursos</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio (€/h)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Evaluación de la rugosidad y textura</b>	Instrumentación	12	10,00	120,00
	Ingeniería	12	25,00	300,00
<b>Método IHD</b>	Maquinaria	8	10,00	80,00
	Instrumentación	8	3,00	24,00
	Ingeniería	8	25,00	200,00
	Material	(Contabilizado en partida general de material)		
<b>Medición dureza</b>	Instrumentación	10	10,00	100,00
	Ingeniería	10	25,00	250,00
<b>SUBTOTAL</b>				1.074,00

Tabla 17. Partida presupuestaria 4

<b>Tarea</b>	<b>Recursos</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio (€/h)</b>	<b>Coste (€)</b>
<b>Resultados de rugosidad y textura superficial</b>	Hardware	5	2,00	10,00
	Software (Excel, SPIP)	5	0,75	3,75
	Ingeniería	5	25,00	125,00
<b>Resultados de tensiones residuales</b>	Hardware	75	2,00	150,00
	Software (Excel, Matlab)	75	0,75	56,25
	Ingeniería	75	25,00	1875,00
<b>Resultados de dureza</b>	Hardware	5	2,00	10,00
	Software (Excel)	5	0,75	3,75
	Ingeniería	5	25,00	125,00
<b>SUBTOTAL</b>				2.358,75

Tabla 18. Partida presupuestaria 5

<b>Recurso material</b>	<b>Unidades</b>	<b>Precio (€/ud)</b>	<b>Coste (€)</b>
Tornillería	10	0,05	0,50
Bola de rodadura de 2 mm	15	0,20	3,00
Bola de bruñido 60Cr3 de 10 mm	10	0,20	2,00
Muelle de compresión	1	3,45	3,45
Grasa de molibdeno	1	7,94	7,94
Paqueta de corte CNMG 120408	5	3,21	16,05
Broca HSS de 3 mm	4	3,60	14,40
Cableado multifilar – 3m	3	4,30	12,90
Hoja de sierra M-42 C	1	12,00	12,00
Barra de acero AISI1038	1	25,00	25,00
Barra de aluminio AA2017-T4	1	25,00	25,00
Maletín de instalación de galgas extensiométricas	1	838,00	838,00
Roseta de galgas HBM 1-RY21-3/120	15	38,8	582,00
Terminal de soldadura 1-LS7	45	0,55	24,75
Conectores de 15 pletinas	3	1,62	4,86
Broca HSS de 8 mm	1	3,60	3,60
Broca de avellanar de 12 mm	1	10,59	10,59
Fresa hemisférica de 8 mm	2	25,44	50,88
Taladrina de corte – 5 L	1	15,54	15,54
Pegamento LOCTITE	1	9,05	9,05
Bobina de estaño	1	3,25	3,25
Soldador de estaño	1	12,95	12,95
<b>SUBTOTAL</b>			<b>1.677,71</b>

Tabla 19. Partida presupuestaria 6

<b>Partida presupuestaria 1</b>	495,00
<b>Partida presupuestaria 2</b>	193,50
<b>Partida presupuestaria 3</b>	278,50
<b>Partida presupuestaria 4</b>	1.074,50
<b>Partida presupuestaria 5</b>	2.358,75
<b>Partida presupuestaria 6</b>	1.677,71
<b>TOTAL</b>	<b>6.077,46 €</b>

Tabla 20. Presupuesto total

## Anexo 2. Fichas técnicas de los materiales ensayados

### A2.1 Acero AISI1038

#### Especificaciones

Acero AISI1038  
ASTM A29, A510, A544, A545, A546, A576  
SAE J403, J412, J414  
DIN 1.1176  
AFNOR XC 38 TS (Francia)

#### Categorías

Metal, Metal ferroso, Acero al carbono, Serie AISI 1000 Metal, Acero al carbono medio.

#### Notas del material

Los usos típicos incluyen mecanizado, pernos, cableado, espárragos de culata y piezas mecanizadas, pernos en U, varillas de refuerzo de hormigón, forjados y muelles no críticos.

#### Propiedades

##### ***Propiedades físicas***

Densidad	7,840 g/cm <sup>3</sup>
----------	-------------------------

##### ***Propiedades mecánicas***

Dureza, Brinell	149
Dureza, Rockwell B	80
Dureza, Vickers	155
Esfuerzo a la tracción, último	515 MPa
Esfuerzo a la tracción, en servicio	285 MPa
Módulo de elasticidad	211 GPa

##### ***Composición química***

Carbono, C	0,35 – 0,42 %
Hierro, Fe	98,60 – 99,05 %

Manganeso, Mn	0,6 – 0,9 %
Fósforo, P	≤0,04 %
Azufre, S	≤0,05 %

Tabla 21. Propiedades del acero AISI1038

## A2.2 Aluminio AA2017-T4

### Especificaciones

Designación SO Al Cu4MgSi  
 AU4G - LA 2017  
 ASTM B 211 y B 316  
 SAE J454  
 ANSI H38.4 y H38.12

### Aplicaciones

Utilizado en componentes para propósitos ingenieriles generales, aplicaciones estructurales en construcción y transporte, tornillería de máquinas y ajustes.

### Propiedades

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad	2800 g/cm³
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Dureza, Brinell	105
Elongación a rotura	22 %
Esfuerzo a tracción, en servicio	275 MPa
Esfuerzo a tracción, último	427 MPa
Módulo de rigidez	27,5 GPa
Módulo de elasticidad	78 GPa
<b>Composición química</b>	
Aluminio, Al	97,7 %
Silicio, Si	0,96 %
Hierro, Fe	0,25 %
Manganeso, Mn	0,55 %
Magnesio, Mg	0,53 %

Tabla 22. Propiedades del aluminio AA2017-T4

## Anexo 3. Programas de mecanizado

### A3.1 Mecanizado hemisférico

#### **PARÁMETROS**

P1=0.3; DECALAJE ENTRE PASADAS

P2=0.2; PROFUNDIDAD PASADA

#### **MECANIZADO**

G58 G90 G1 X10 Y0 Z5 S6000 F600 M3

Z-P2

N10: G90 G1 X-80 F600

Z5

G0 G91 YP1 X80

G1 G90 Z-P2

[L#20]

#RPT[N10 [L#20],230]

Z10

M30

### A3.2 Bruñido (5 pasadas)

#### **PARÁMETROS**

P25=2; SELECCIONAR ESTRATEGIA 1=PERPENDICULAR 2= PARALELA

P0 = 0; Coordenada X huella local

P1 = 0; Coordenada Y huella local

P2 = -1.340; valor NEGATIVO coordenada z (fuerza de bruñido)

P3 = 0.3; Valor absoluto paso lateral

P5 = 1; Multiplicador paso lateral

P4 = 15; Ancho huella

P6 = 600; Avance

P15 = 0; Contador de pasadas

### ***FUNCIONES DE PREPARACION Y POSICIONAMIENTO***

G58

G01 G90 XP0 YP1 F600

ZP2

\$WHILE P3\*P15 < P4

G91 G1 XP4 FP6

YP3

X-P4

YP3

P15 = P15 + 2

\$ENDWHILE

### ***PASADAS DE BRUÑIDO***

\$IF P25==1

\$GOTO N10

\$ELSEIF P25 ==2

\$GOTO N20

\$ELSE

\$GOTO N30

\$ENDIF

### **PASADAS PERPENDICULARES**

N10: P15 = 0

\$WHILE P3\*P15 < P4

G91 G1 Y-P4

XP3\*P5

YP4

XP3\*P5

P15 = P15 + 2

\$ENDWHILE

Z10

M30

### **PASADAS PARALELAS**

N20: P15 = 0

G91 G1 YP3\*P5/2

\$WHILE P3\*P15 < P4

G91 G1 Y-P3\*P5

XP4

Y-P3\*P5

X-P4

P15 = P15 + 2

\$ENDWHILE

Z10

M30

## **A3.3 Método del taladro incremental (IHD)**

### **PARÁMETROS**

P1=0; Profundidad absoluta en cada pasada

P2=0.05; Incremento de profundidad entre pasadas

P3=4; Profundidad máxima de taladrado

### **FUNCIONES DE PREPARACION Y POSICIONAMIENTO**

G56

G00 G90 F300 S6000 M3

X0 Y0 Z10

### **TALADRADO**

\$WHILE P3 >= P1

G01 Z-P1 F25

G00 Z1

G04 K5

P1 = P1 + P2

\$ENDWHILE

M30



## Anexo 4. Resultados de rugosidad y textura superficial

### A4.1 Acero AISI1038

<b>Superficie original</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	5626,1
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	6339,3
<b>S<sub>sk</sub></b>	0,33172
<b>S<sub>ku</sub></b>	1,8024
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	72375
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	28851
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	51306
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	21068
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	0,62538
<b>S<sub>dq</sub></b>	0,14465
<b>S<sub>dr</sub> (%)</b>	1,4286
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	9349,1
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	11160
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	141,34

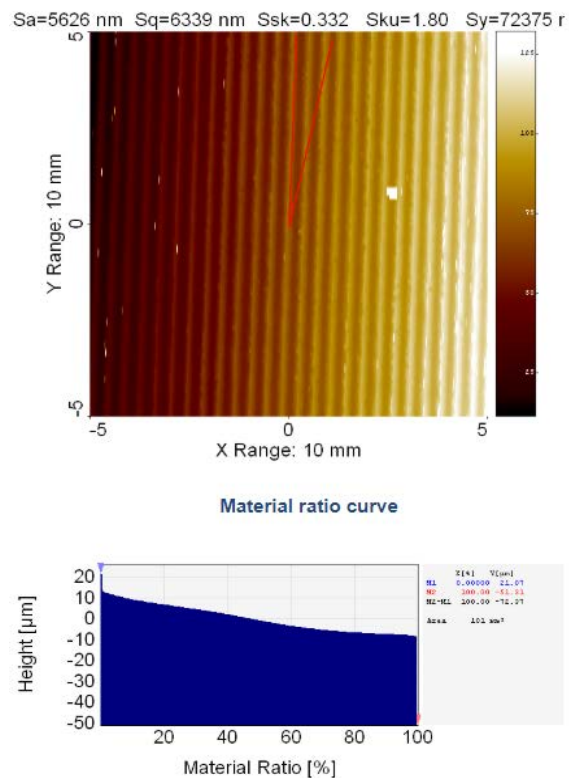


Tabla 23. Valores de rugosidad y textura superficial iniciales en acero AISI1038

<b>Huella 1</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	659,83
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	839,17
<b>S<sub>sk</sub></b>	0,80731
<b>S<sub>ku</sub></b>	2,8429
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	40941
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	20751
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	5752
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	35189
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	-2,5275
<b>S<sub>dq</sub></b>	0,044134
<b>S<sub>dr</sub> (%)</b>	0,089056
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	2679,9
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	2136,6
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	88,816

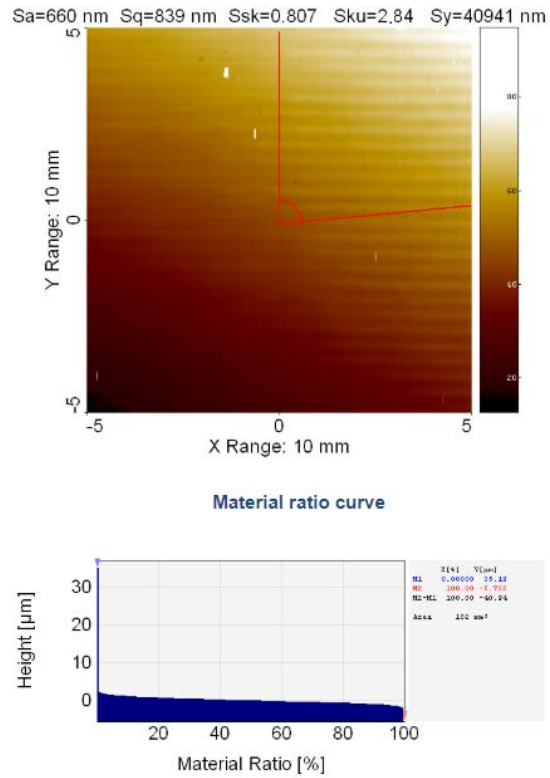


Tabla 24. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 1 en acero AISI1038

<b>Huella 2</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	1040,5
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	1290,5
<b>S<sub>sk</sub></b>	0,6808
<b>S<sub>ku</sub></b>	3,3644
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	19860
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	15146
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	5306,7
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	14553
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	-4,7273
<b>S<sub>dq</sub></b>	0,038108
<b>S<sub>dr</sub> (%)</b>	0,073122
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	2184,2
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	2719,8
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	88,777

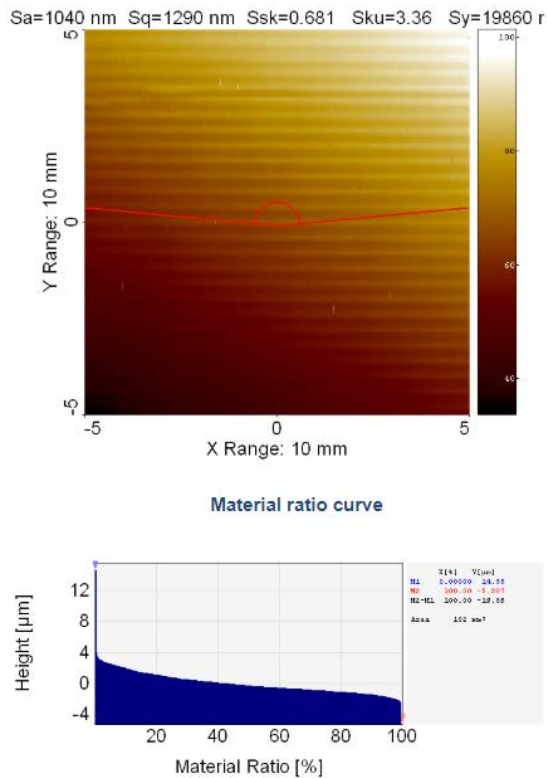
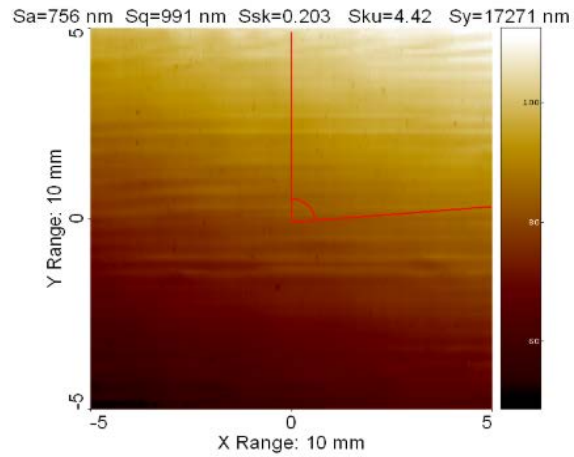


Tabla 25. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 2 en acero AISI1038

**Huella 3**

$S_a$ (nm)	755,88
$S_q$ (nm)	991,49
$S_{sk}$	0,20293
$S_{ku}$	4,4199
$S_z$ (nm)	17271
$S_{10z}$ (nm)	12749
$S_v$ (nm)	7903,3
$S_p$ (nm)	9367,3
$S_{mean}$ (nm)	12,687
$S_{dq}$	0,038686
$S_{dr}$ (%)	0,074995
$S_{pk}$ (nm)	1544,6
$S_k$ (nm)	2221,4
$S_{td}$ (°)	89,092



**Material ratio curve**

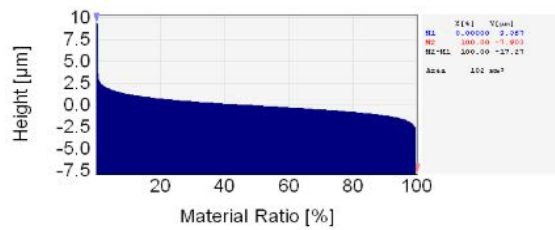
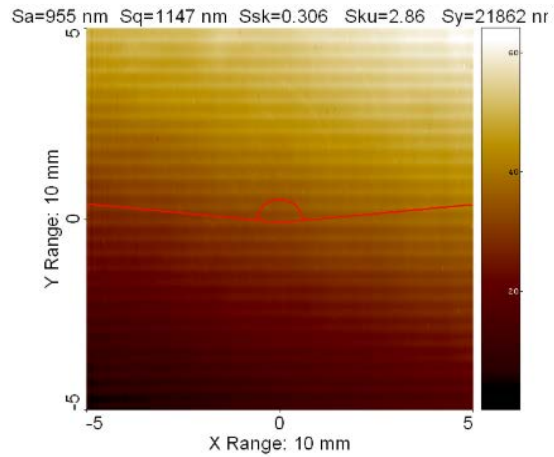


Tabla 26. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 3 en acero AISI1038

**Huella 4**

$S_a$ (nm)	955,05
$S_q$ (nm)	1147,3
$S_{sk}$	0,30582
$S_{ku}$	2,8577
$S_z$ (nm)	21862
$S_{10z}$ (nm)	13676
$S_v$ (nm)	6962,9
$S_p$ (nm)	14899
$S_{mean}$ (nm)	-9,103
$S_{dq}$	0,05481
$S_{dr}$ (%)	0,14727
$S_{pk}$ (nm)	1452,3
$S_k$ (nm)	2832,9
$S_{td}$ (°)	89,346



**Material ratio curve**

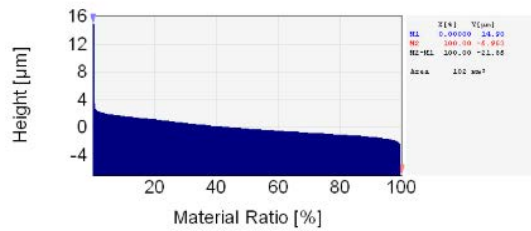
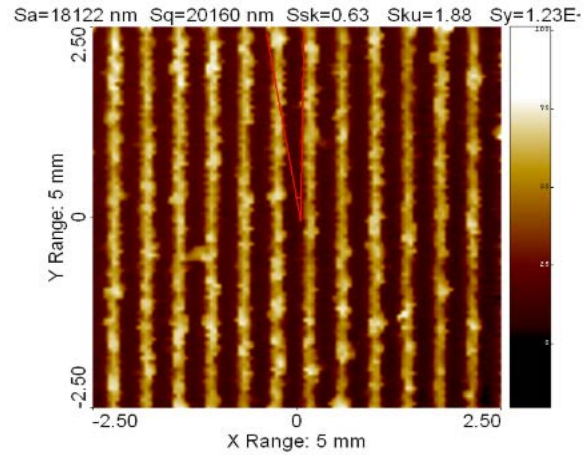


Tabla 27. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 4 en acero AISI1038

## A4.2 Aluminio AA2017-T4

<b>Superficie original</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	18122
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	20160
<b>S<sub>sk</sub></b>	0,63047
<b>S<sub>ku</sub></b>	1,8791
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	123380
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	75990
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	51832
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	71545
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	22,392
<b>S<sub>ch</sub> (°)</b>	10,59
<b>S<sub>fd</sub></b>	2,7312
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	52587
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	14054
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	0



**Material ratio curve**

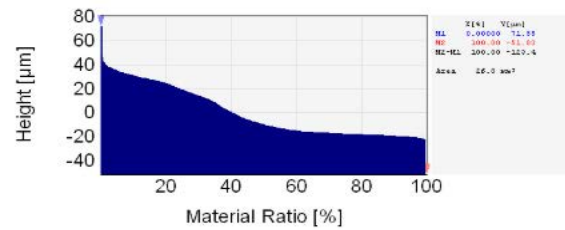
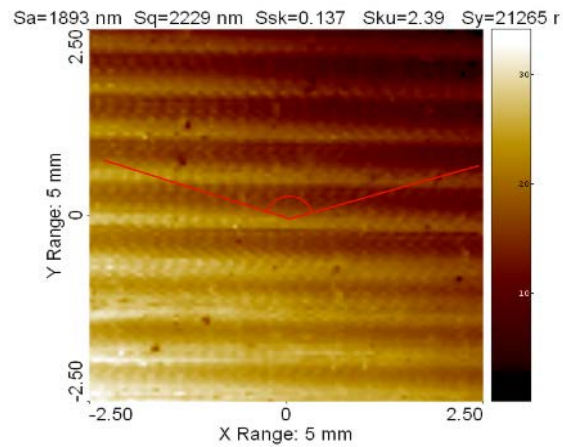


Tabla 28. Valores de rugosidad y textura superficial iniciales en aluminio AA2017-T4

<b>Huella 1</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	1892,8
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	2228,9
<b>S<sub>sk</sub></b>	0,13732
<b>S<sub>ku</sub></b>	2,3871
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	21265
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	17184
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	12152
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	9113,1
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	14,332
<b>S<sub>ch</sub> (°)</b>	144,79
<b>S<sub>fd</sub></b>	2,6682
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	6421,7
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	6421,7
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	88,846



**Material ratio curve**

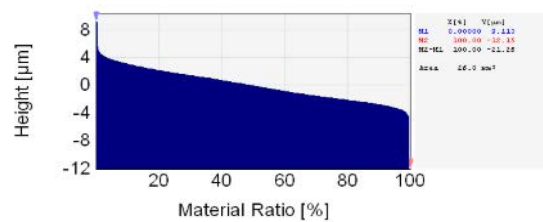


Tabla 29. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 1 en aluminio AA2017-T4

<b>Huella 2</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	1042,6
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	1294,1
<b>S<sub>sk</sub></b>	-0,0078578
<b>S<sub>ku</sub></b>	2,9165
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	15129
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	12574
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	8288,6
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	6840,7
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	15,824
<b>S<sub>ch</sub> (°)</b>	147,65
<b>S<sub>fd</sub></b>	2,5238
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	1218,1
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	3284,7
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	89,081

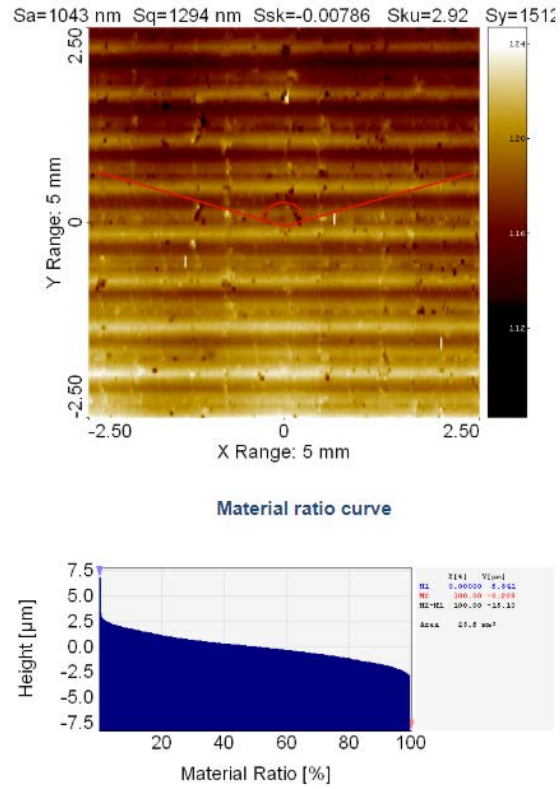


Tabla 30. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 2 en aluminio AA2017-T4

<b>Huella 3</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	1162,6
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	1435,2
<b>S<sub>sk</sub></b>	-0,30717
<b>S<sub>ku</sub></b>	6,1335
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	23356
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	16265
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	13338
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	10018
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	11,209
<b>S<sub>ch</sub> (°)</b>	89,307
<b>S<sub>fd</sub></b>	2,6296
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	1277,4
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	3979,5
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	87,033

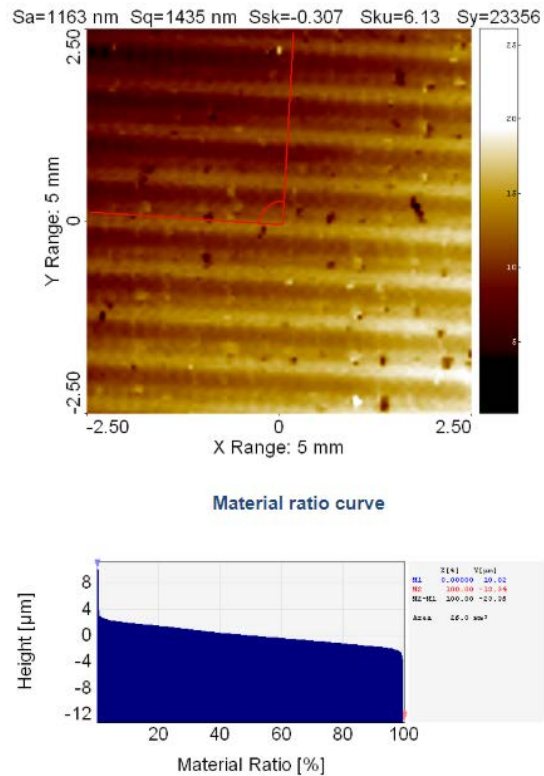


Tabla 31. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 3 en aluminio AA2017-T4

<b>Huella 4</b>	
<b>S<sub>a</sub> (nm)</b>	1813,7
<b>S<sub>q</sub> (nm)</b>	2327,5
<b>S<sub>sk</sub></b>	-0,6444
<b>S<sub>ku</sub></b>	5,2416
<b>S<sub>z</sub> (nm)</b>	22621
<b>S<sub>10z</sub> (nm)</b>	21010
<b>S<sub>v</sub> (nm)</b>	15778
<b>S<sub>p</sub> (nm)</b>	6842,5
<b>S<sub>mean</sub> (nm)</b>	5,9161
<b>S<sub>ch</sub> (°)</b>	73,268
<b>S<sub>fd</sub></b>	2,5469
<b>S<sub>pk</sub> (nm)</b>	1861,2
<b>S<sub>k</sub> (nm)</b>	5921,8
<b>S<sub>td</sub> (°)</b>	88,9

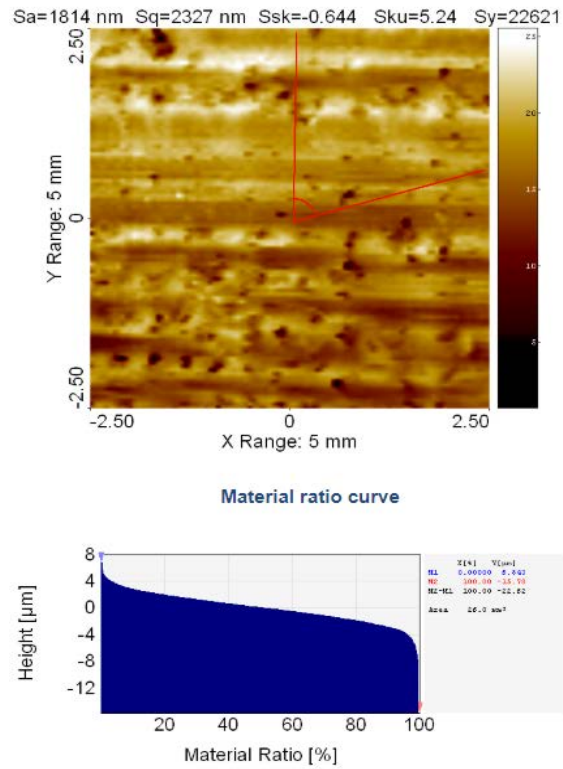


Tabla 32. Valores de rugosidad y textura superficial de la huella 4 en aluminio AA2017-T4



## Anexo 5. Imágenes de la textura superficial

### A5.1 Acero AISI1038

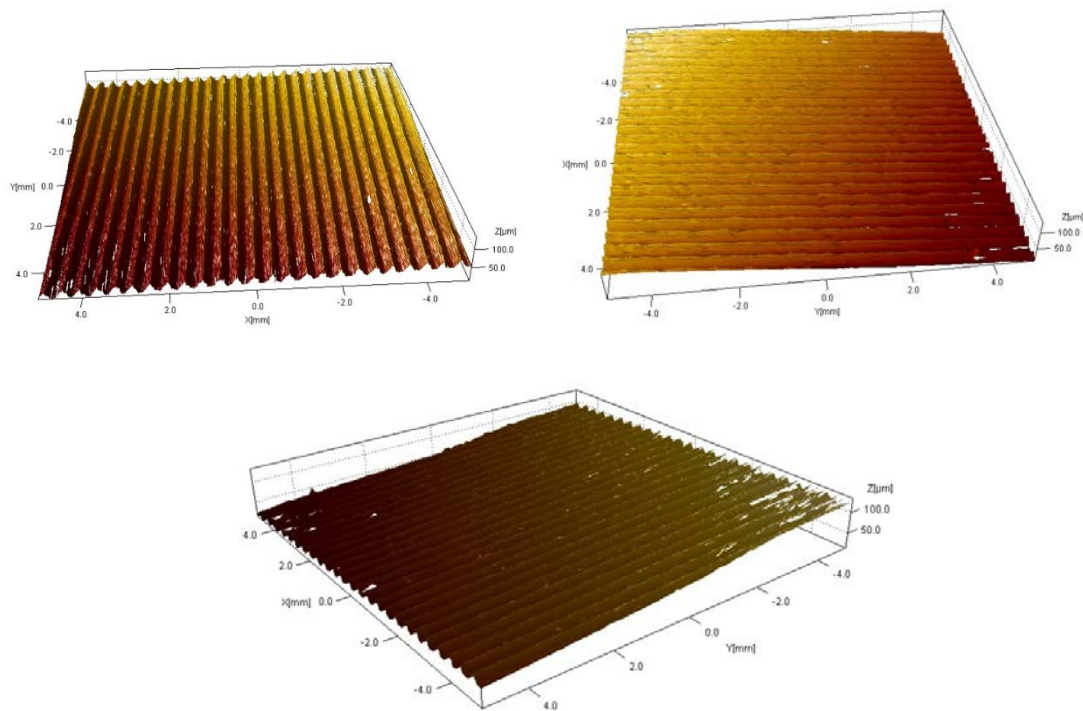


Figura 41. Textura superficial original del acero AISI1038

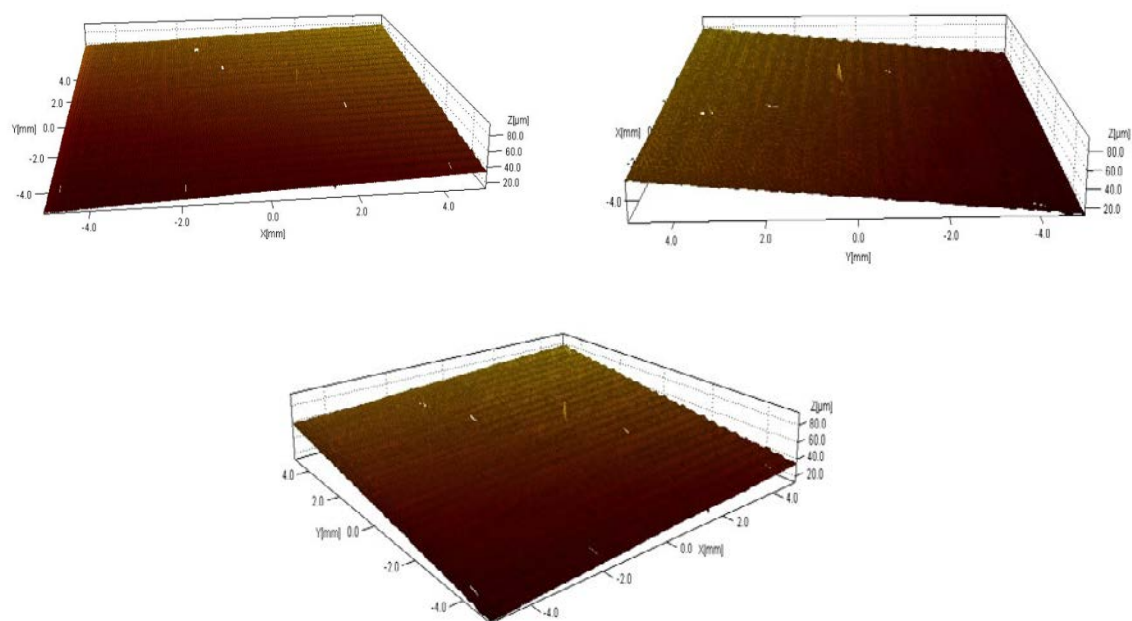


Figura 42. Textura superficial de la huella 1 del acero AISI1038

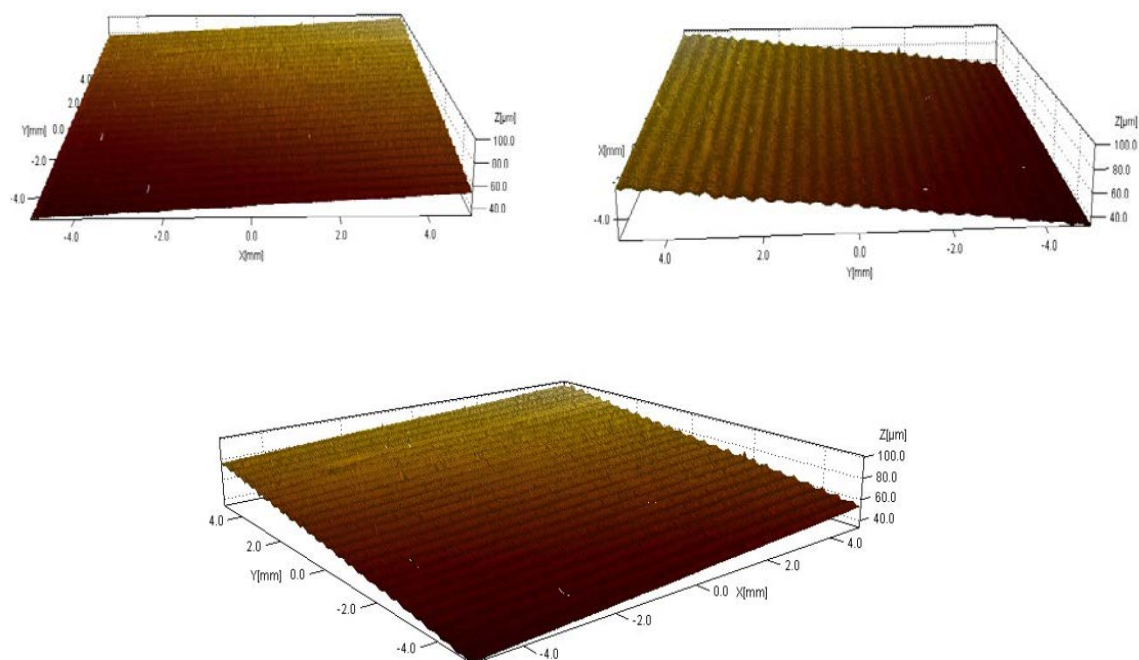


Figura 43. Textura superficial de la huella 2 del acero AISI1038



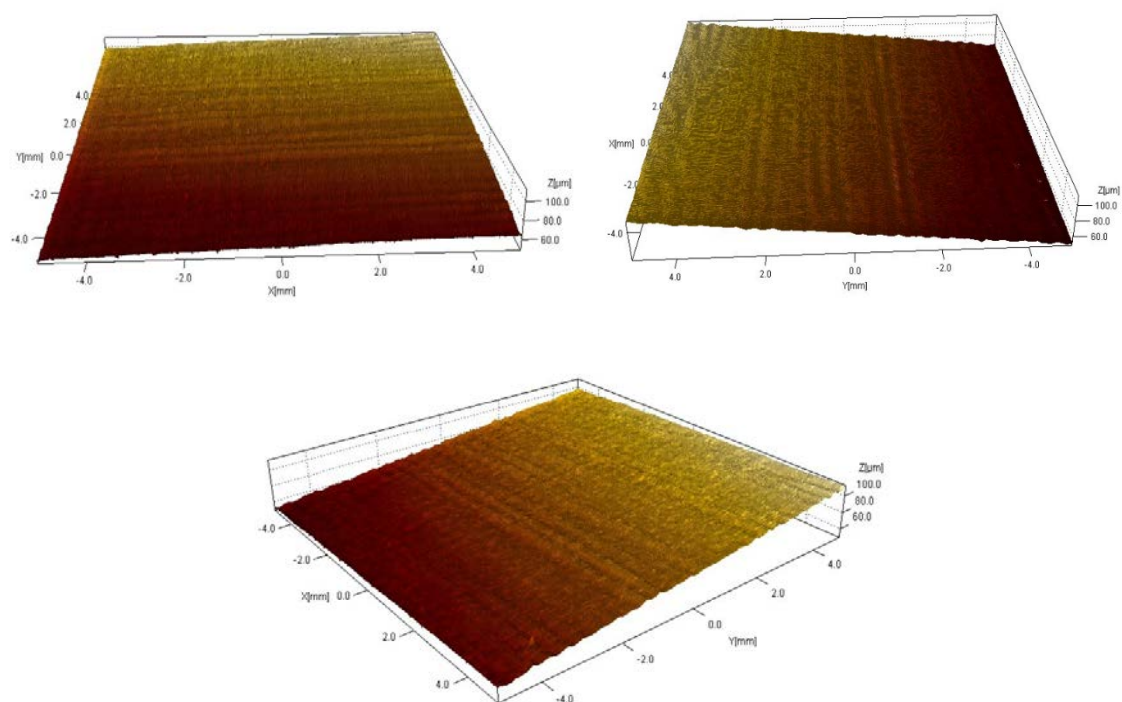


Figura 44. Textura superficial de la huella 3 del acero AISI1038

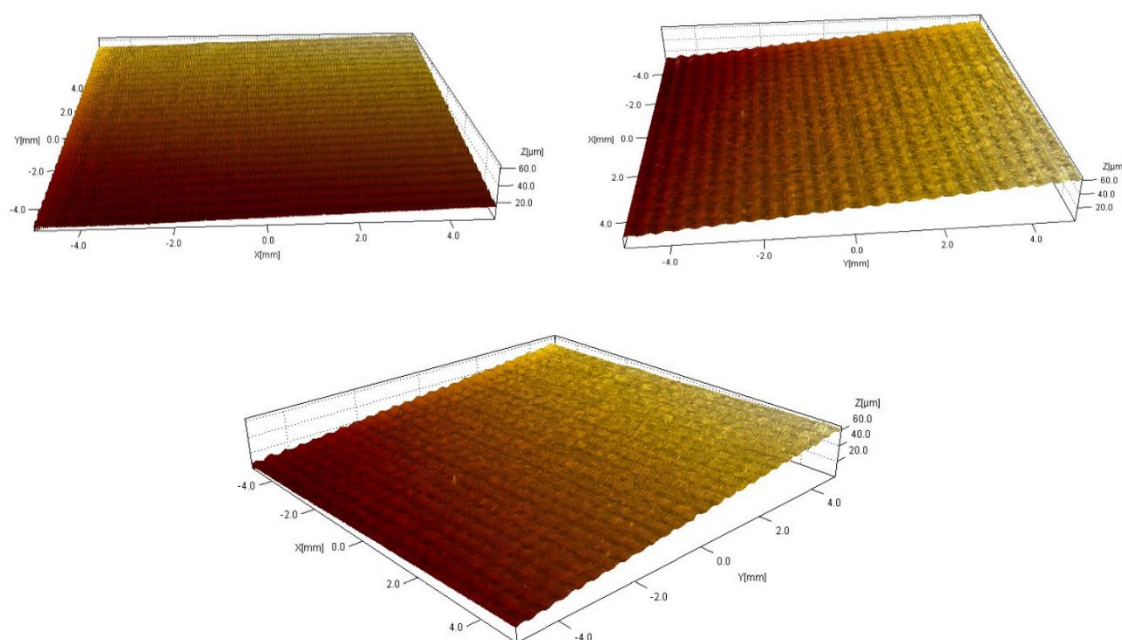


Figura 45. Textura superficial de la huella 4 del acero AISI1038

## A5.2 Aluminio AA2017-T4

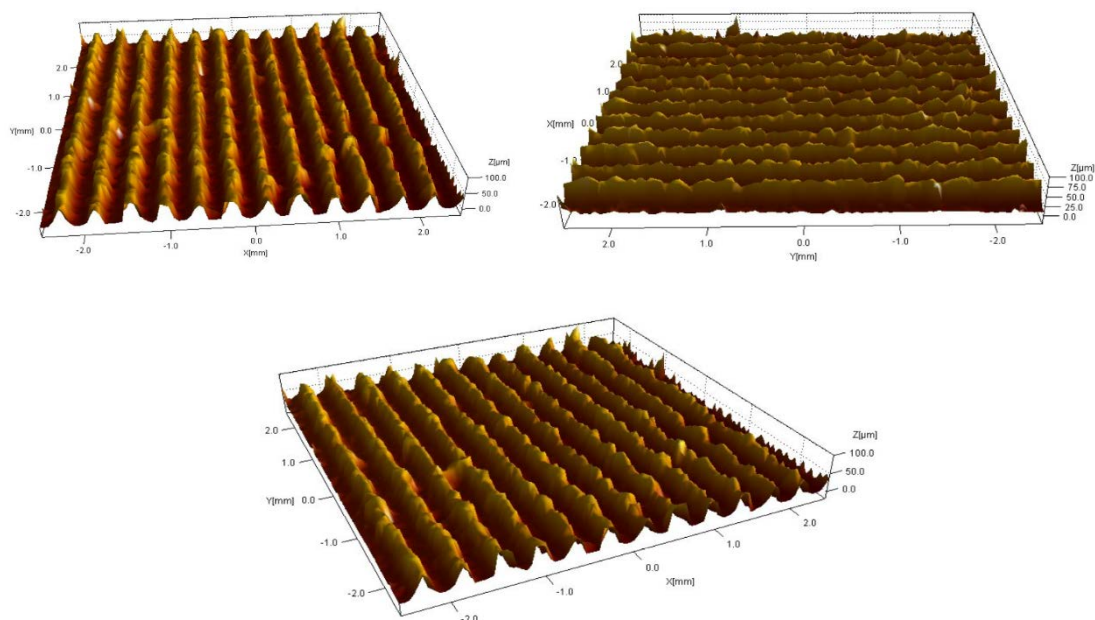


Figura 46. Textura superficial original del aluminio AA2017-T4

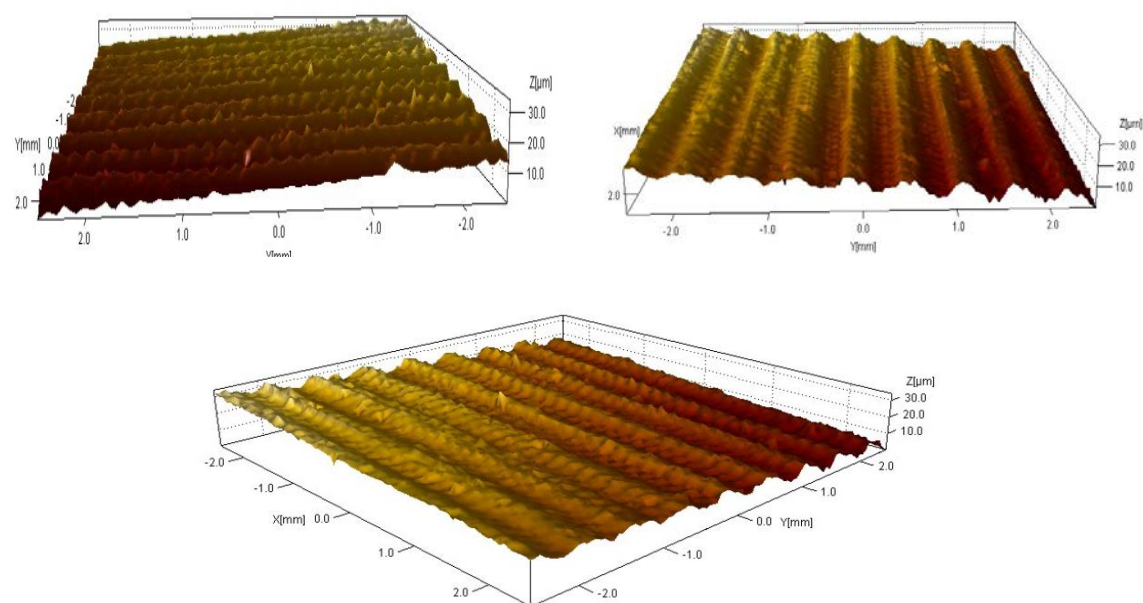


Figura 47. Textura superficial de la huella 1 del aluminio AA2017-T4

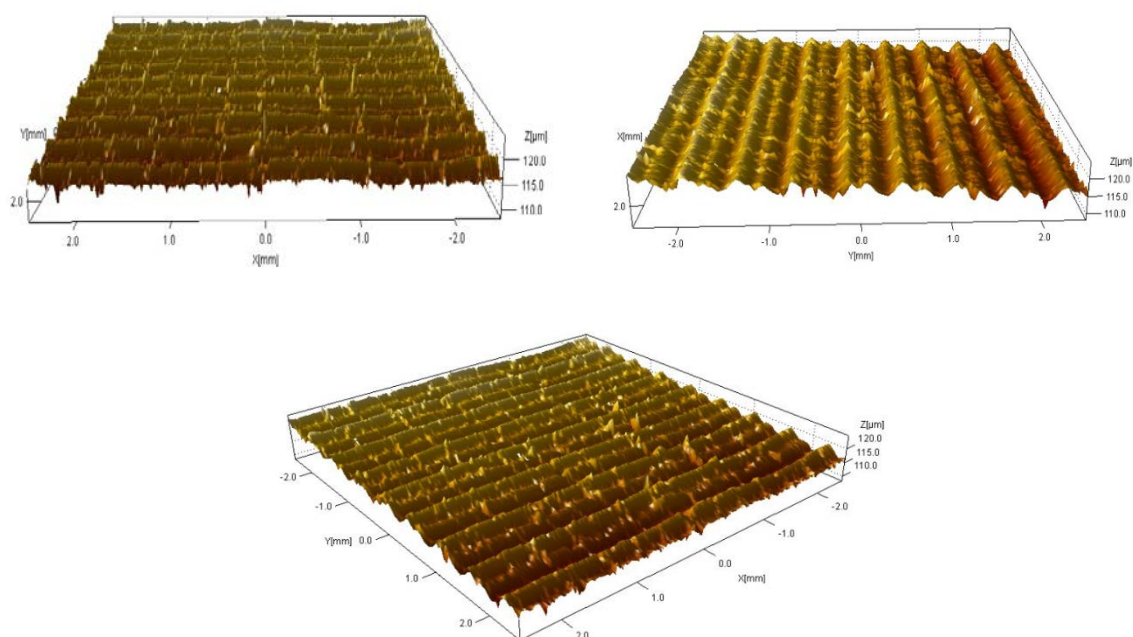


Figura 48. Textura superficial de la huella 2 del aluminio AA2017-T4

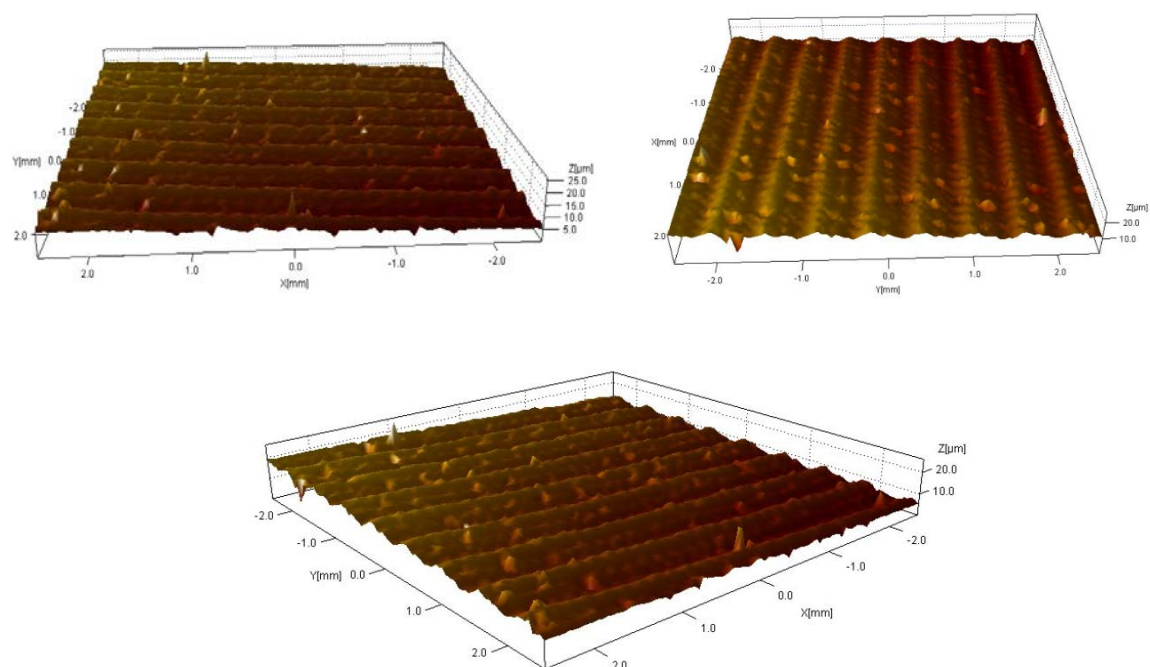
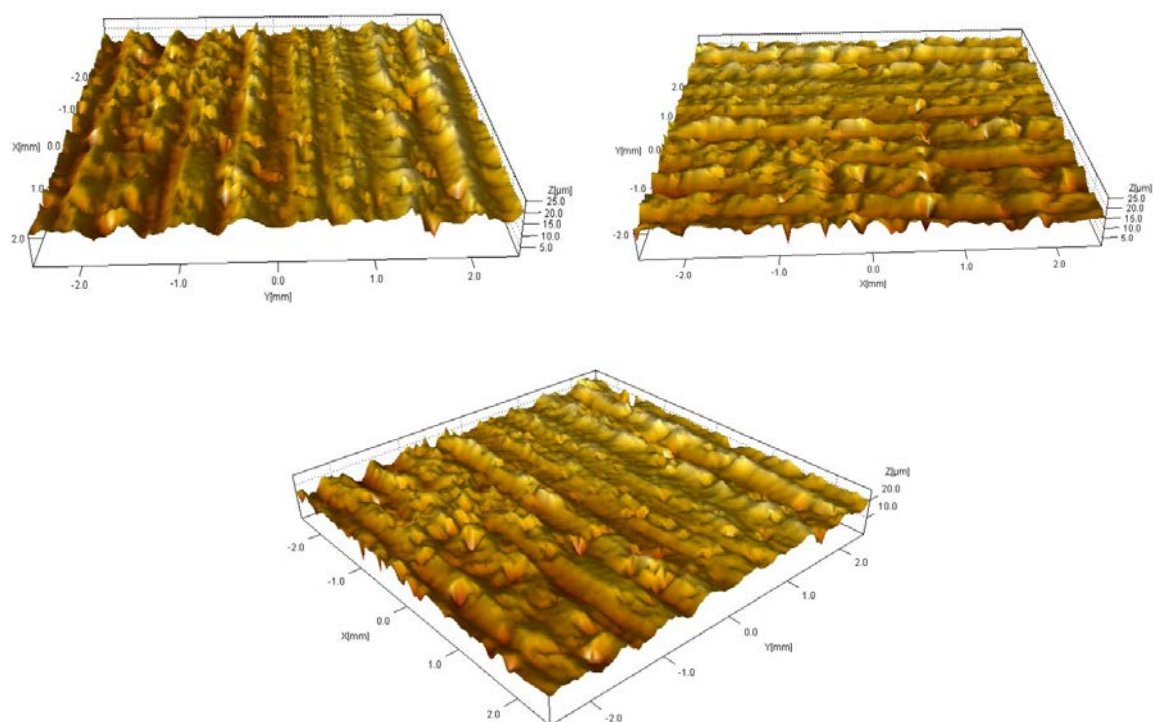


Figura 49. Textura superficial de la huella 3 del aluminio AA2017-T4



*Figura 50. Textura superficial de la huella 4 del aluminio AA2017-T4*

## Anexo 6. Gráficas de tensiones residuales

### A6.1 Acero AISI1038

#### A6.1.1 Elongaciones galgas extensiométricas

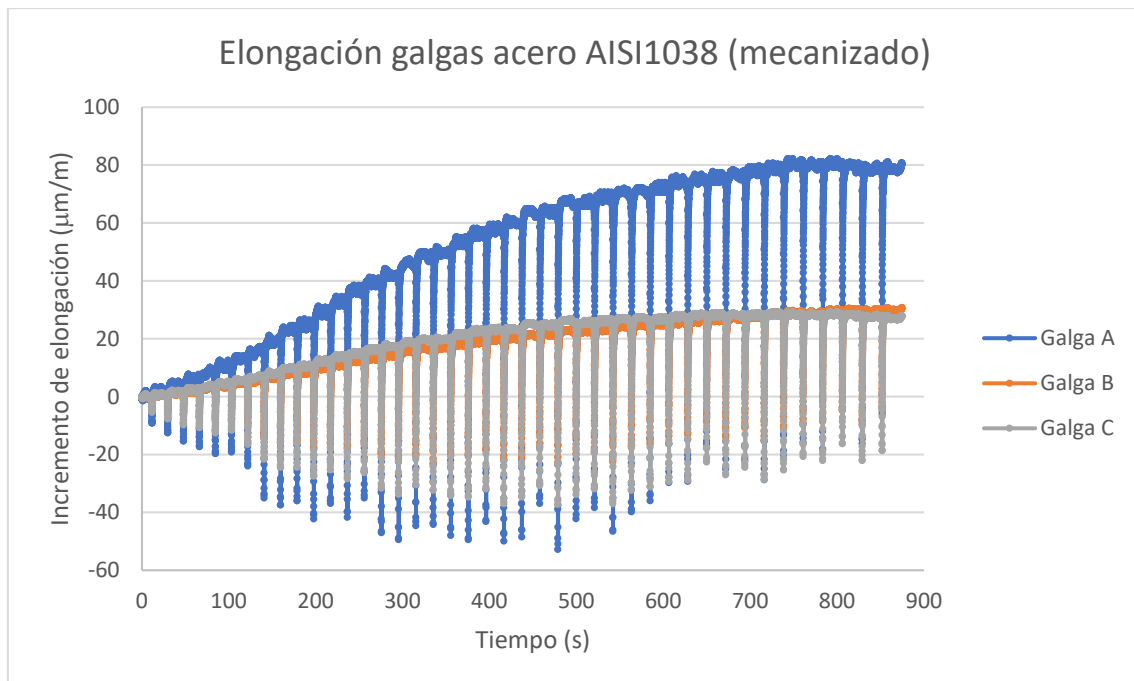


Figura 51. Elongación de las galgas en la superficie original del acero AISI1038



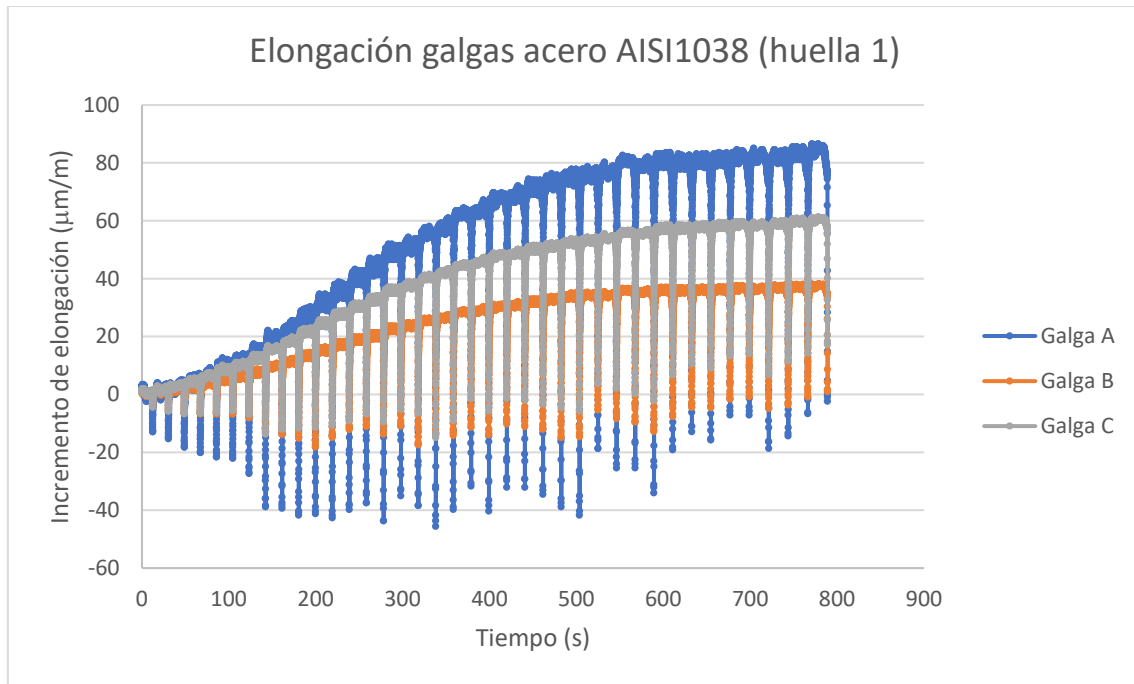


Figura 52. Elongación de las galgas en la huella 1 del acero AISI1038

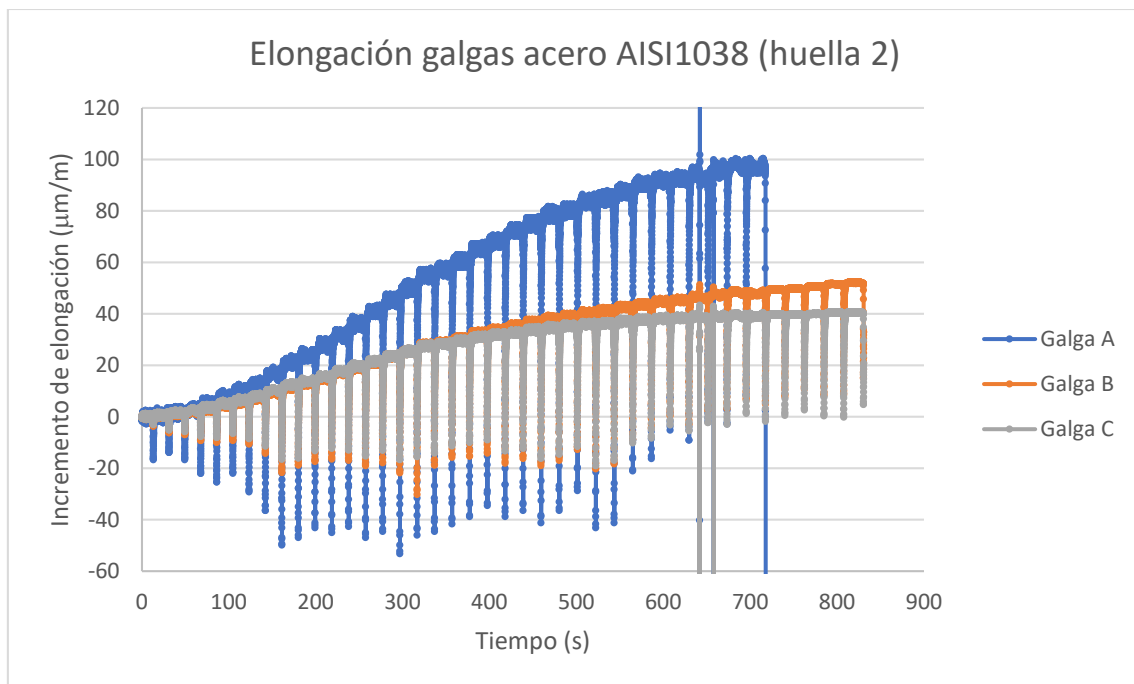


Figura 53. Elongación de las galgas en la huella 2 del acero AISI1038

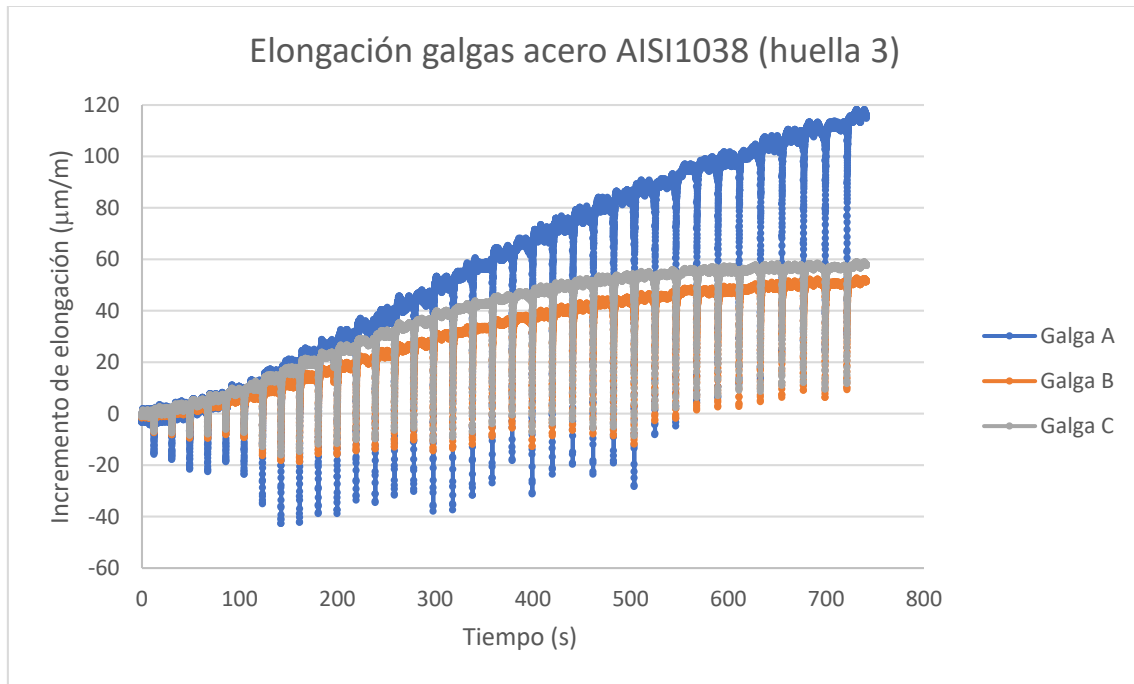


Figura 54. Elongación de las galgas en la huella 3 del acero AISI1038

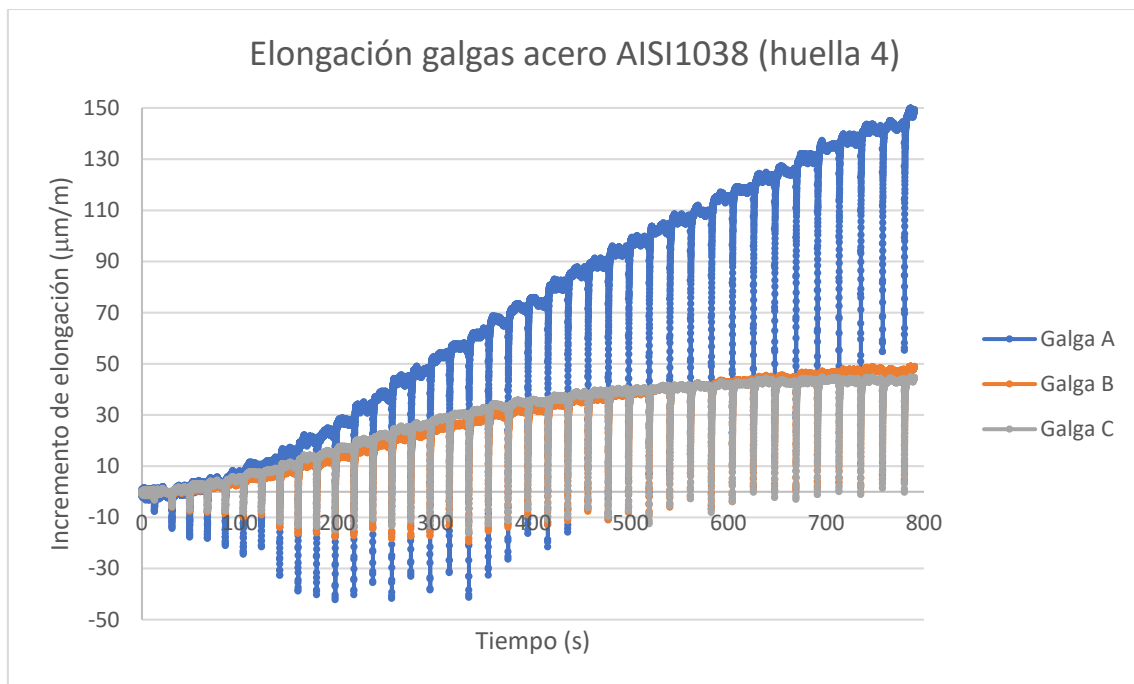


Figura 55. Elongación de las galgas en la huella 4 del acero AISI1038

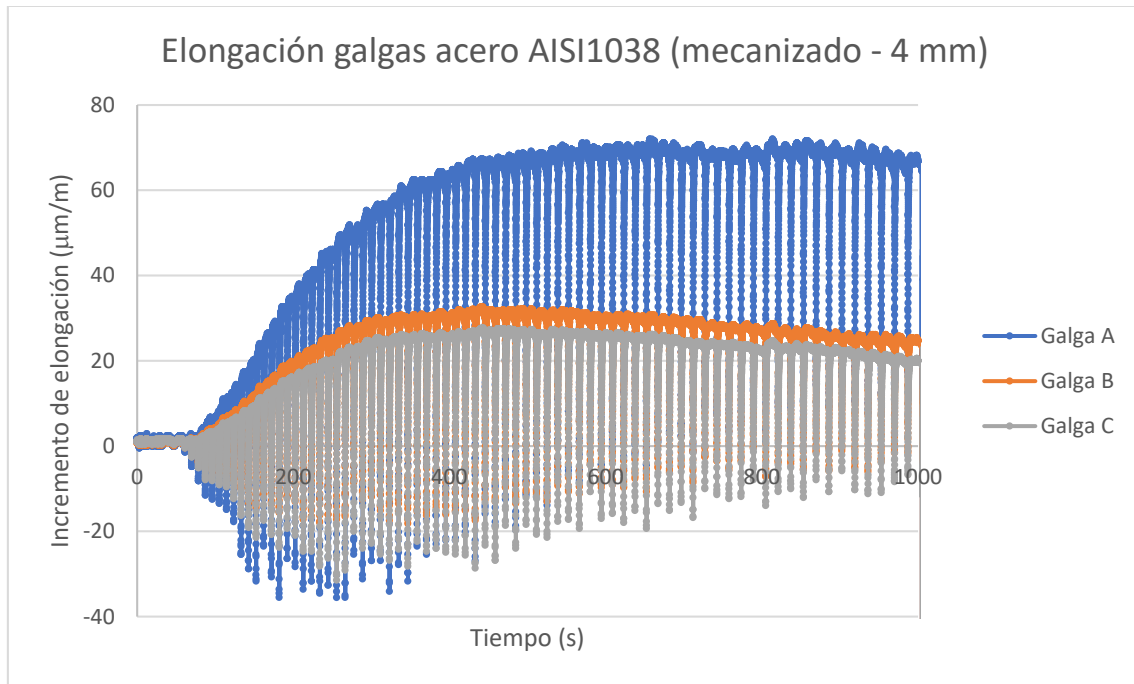


Figura 56. Elongación de las galgas en la superficie original del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)

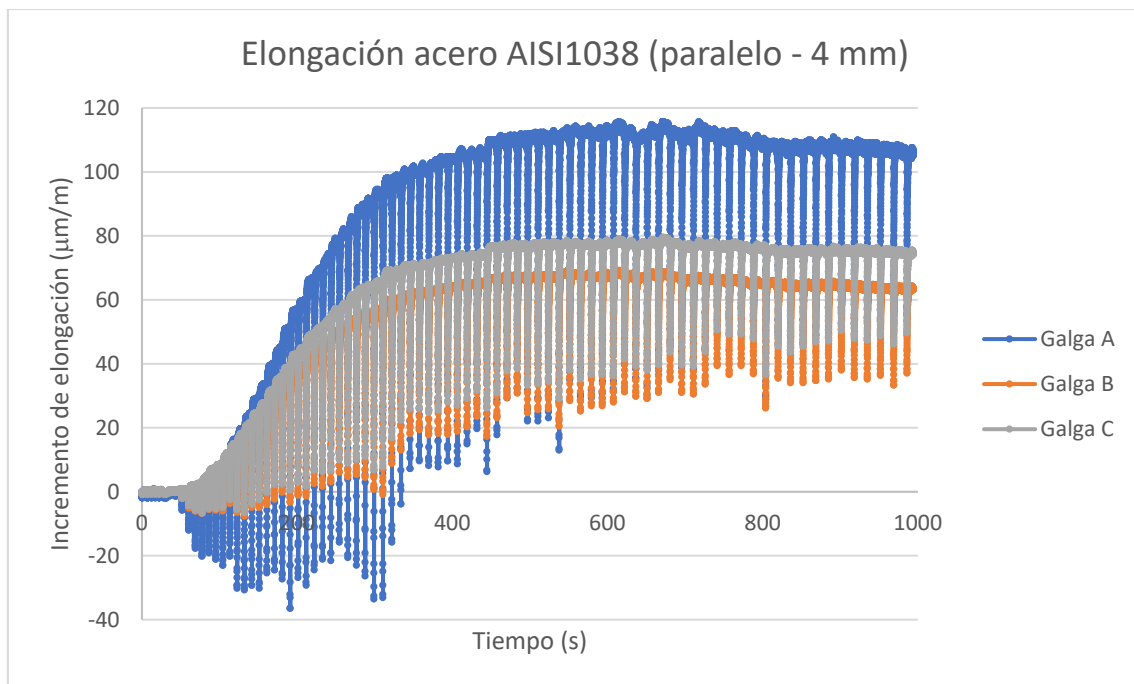


Figura 57. Elongación de las galgas en la huella con pasadas paralelas del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)



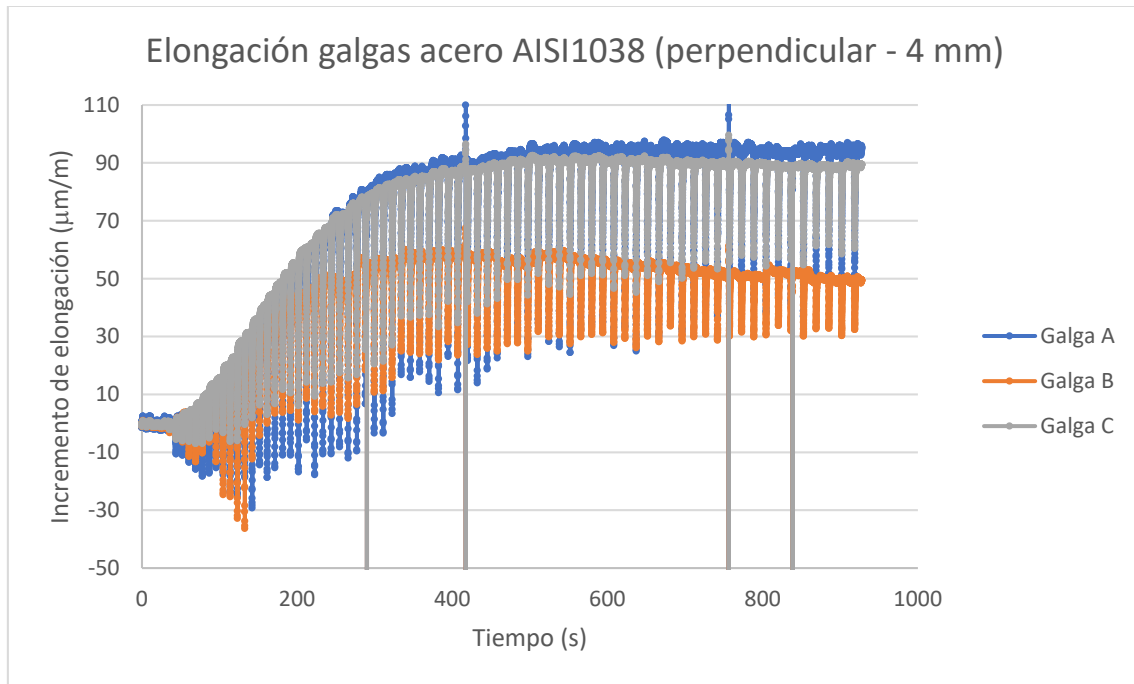


Figura 58. Elongación de las galgas en la huella con pasadas perpendiculares del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)

### A6.1.2 Tensiones principales incrementales

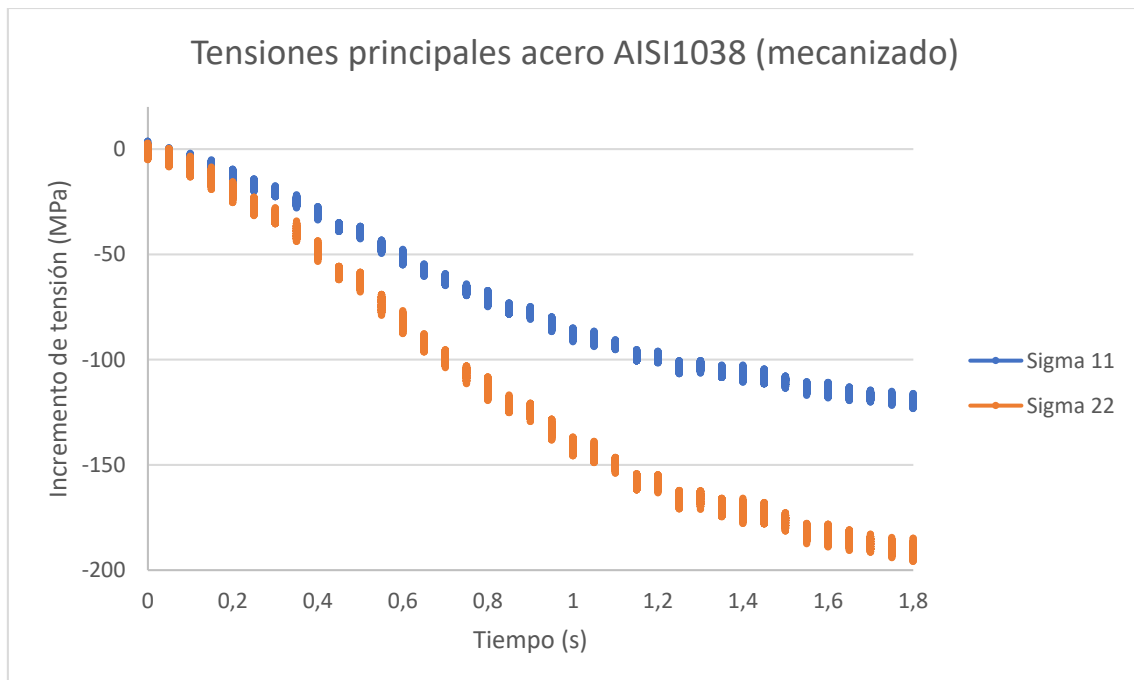


Figura 59. Incremento en las tensiones principales de la superficie original del acero AISI1038

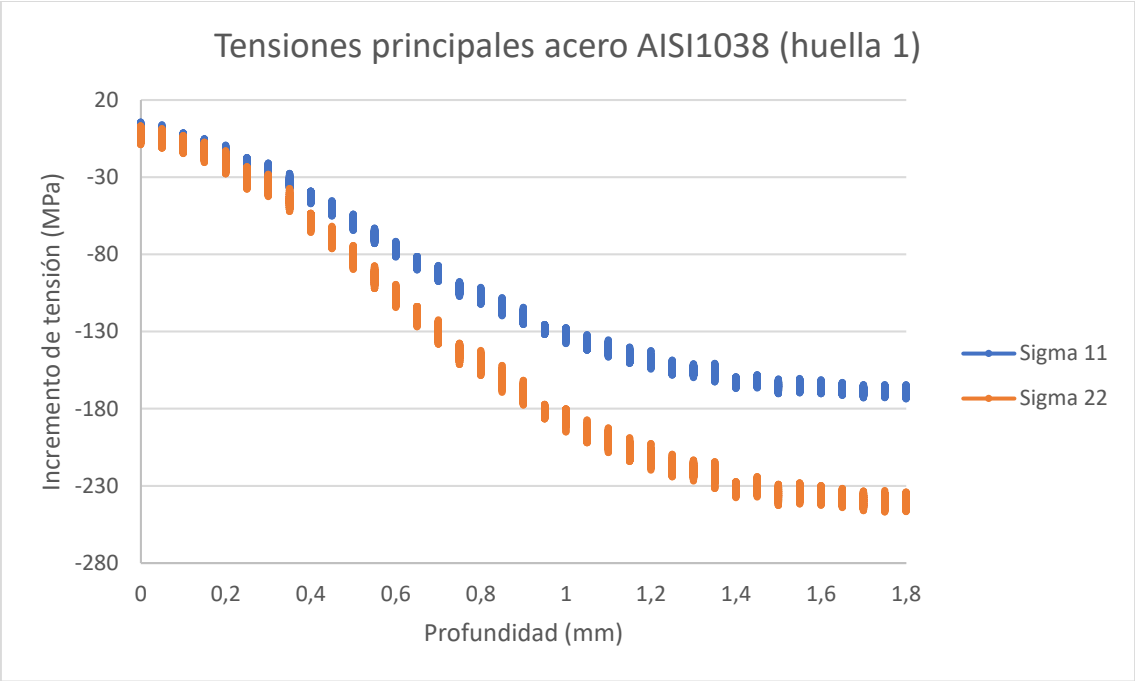


Figura 60. Incremento en las tensiones principales de la huella 1 del acero AISI1038

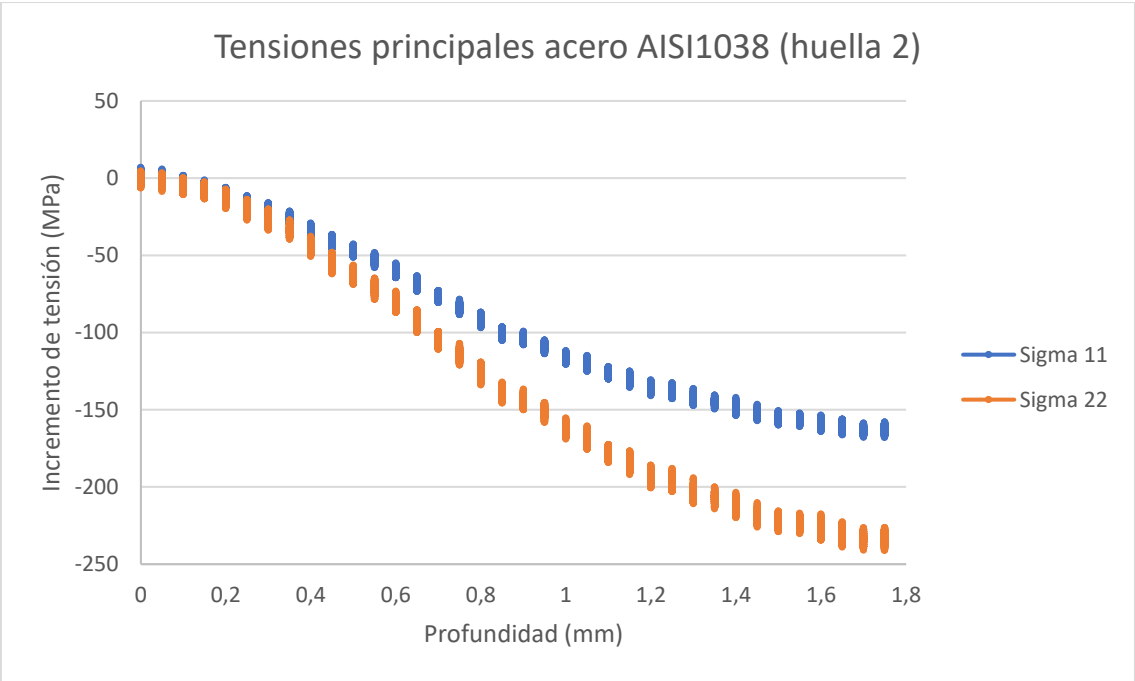


Figura 61. Incremento en las tensiones principales de la huella 2 del acero AISI1038

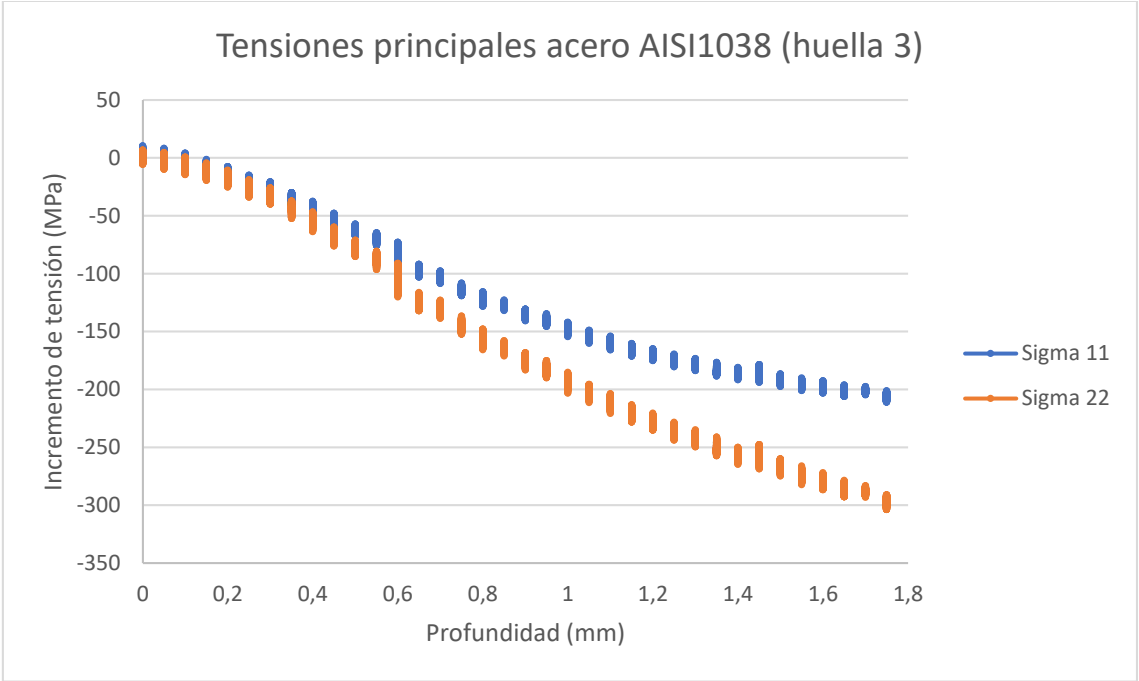


Figura 62. Incremento en las tensiones principales de la huella 3 del acero AISI1038

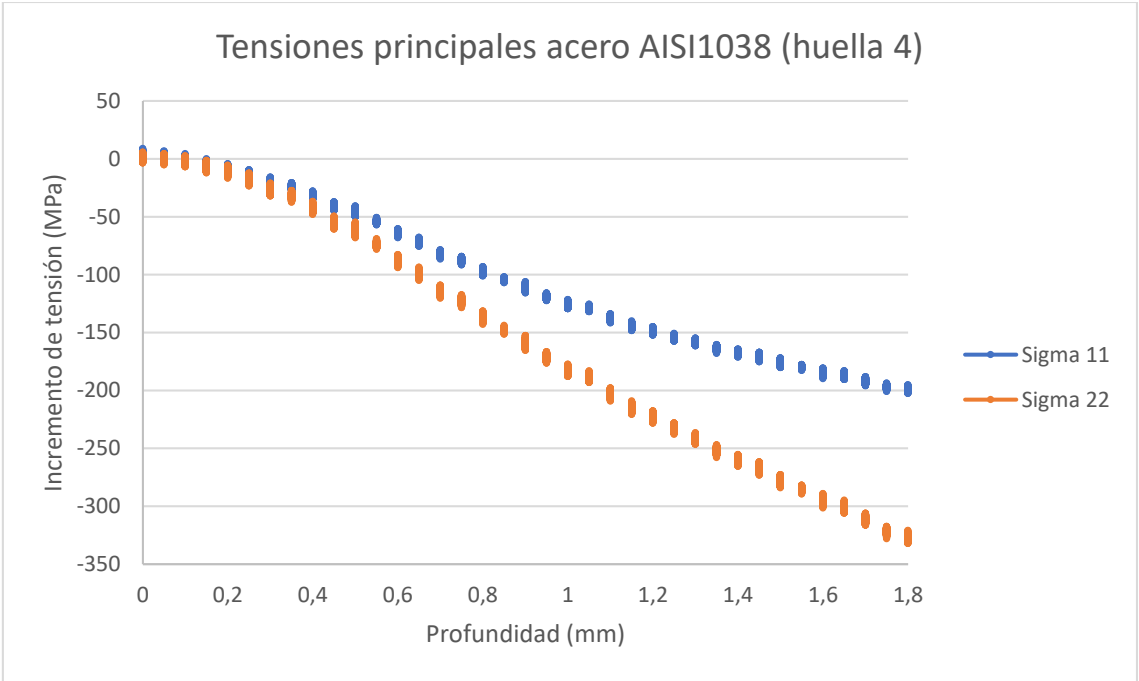


Figura 63. Incremento en las tensiones principales de la huella 4 del acero AISI1038

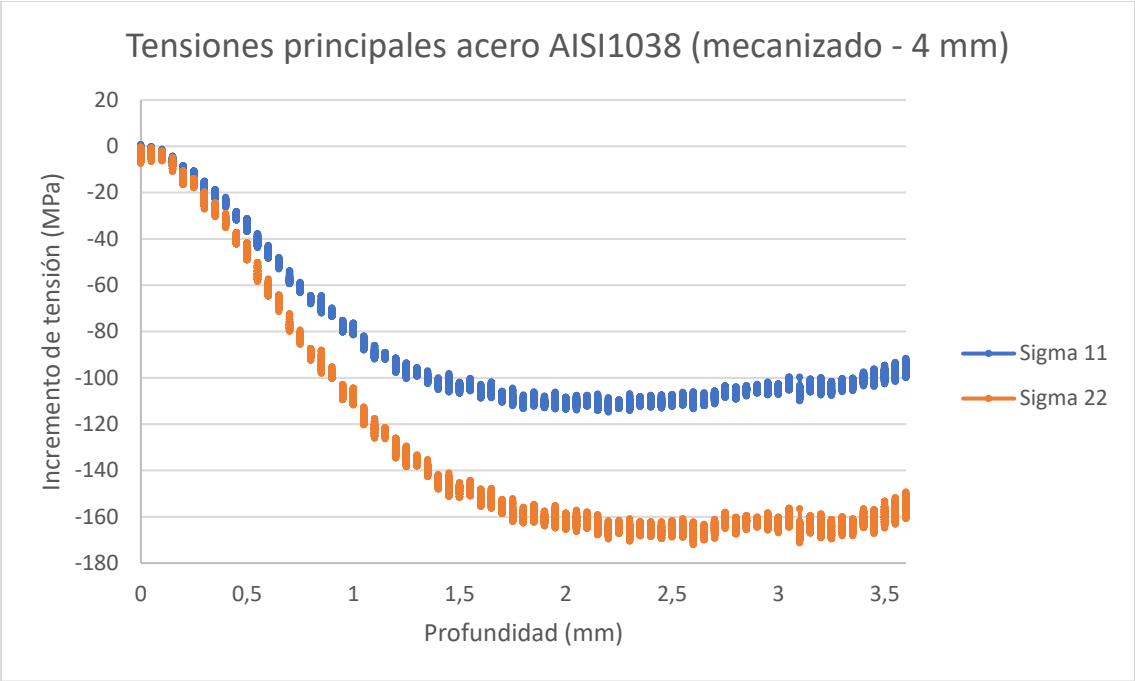


Figura 64. Incremento en las tensiones principales de la superficie original del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)

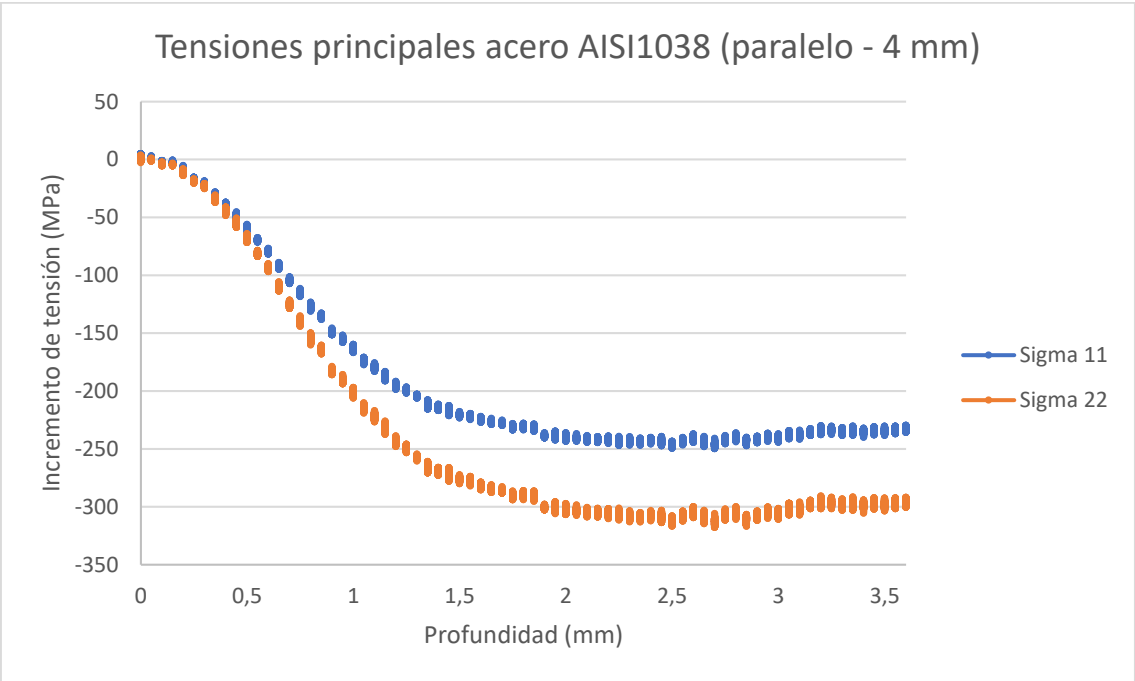


Figura 65. Incremento en las tensiones principales de la huella con pasadas paralelas del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)

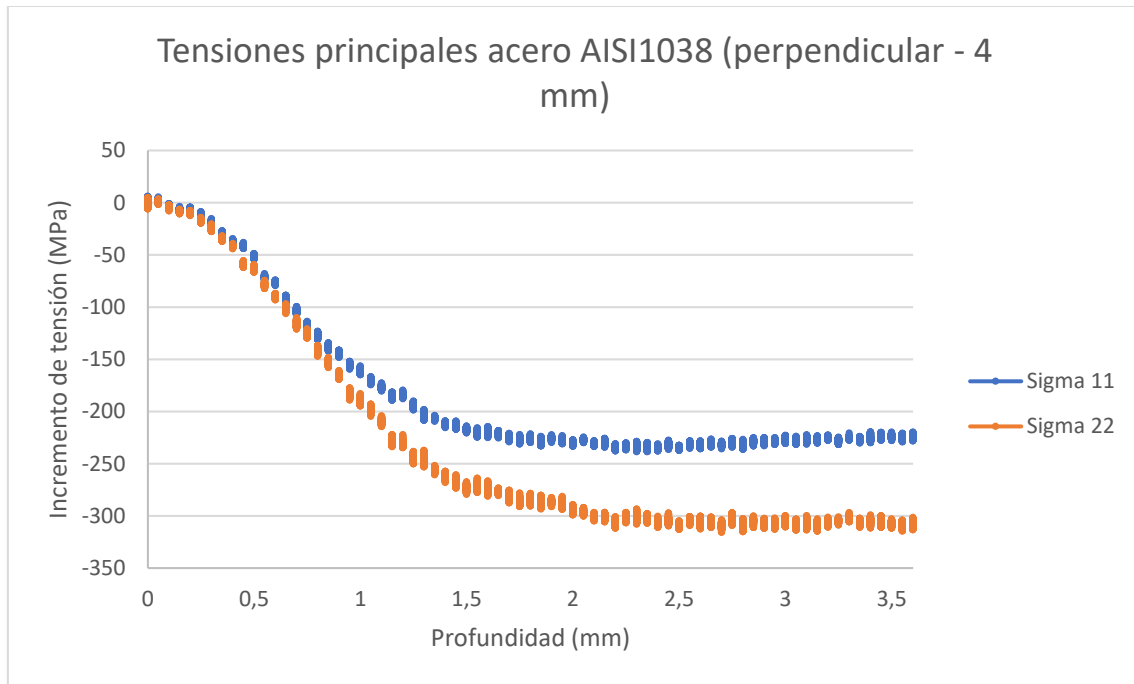


Figura 66. Incremento en las tensiones principales de la huella con pasadas perpendiculares del acero AISI1038 (profundidad de 4 mm)

### A6.1.3 Tensión equivalente de Von Mises

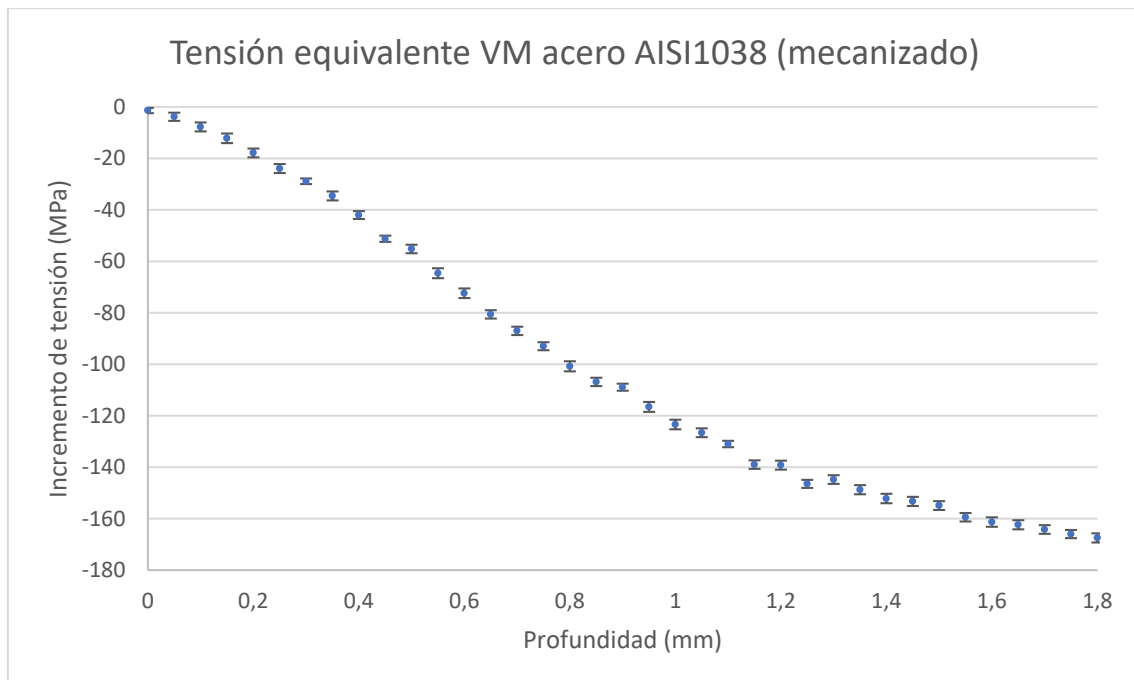


Figura 67. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la superficie original del acero AISI1038

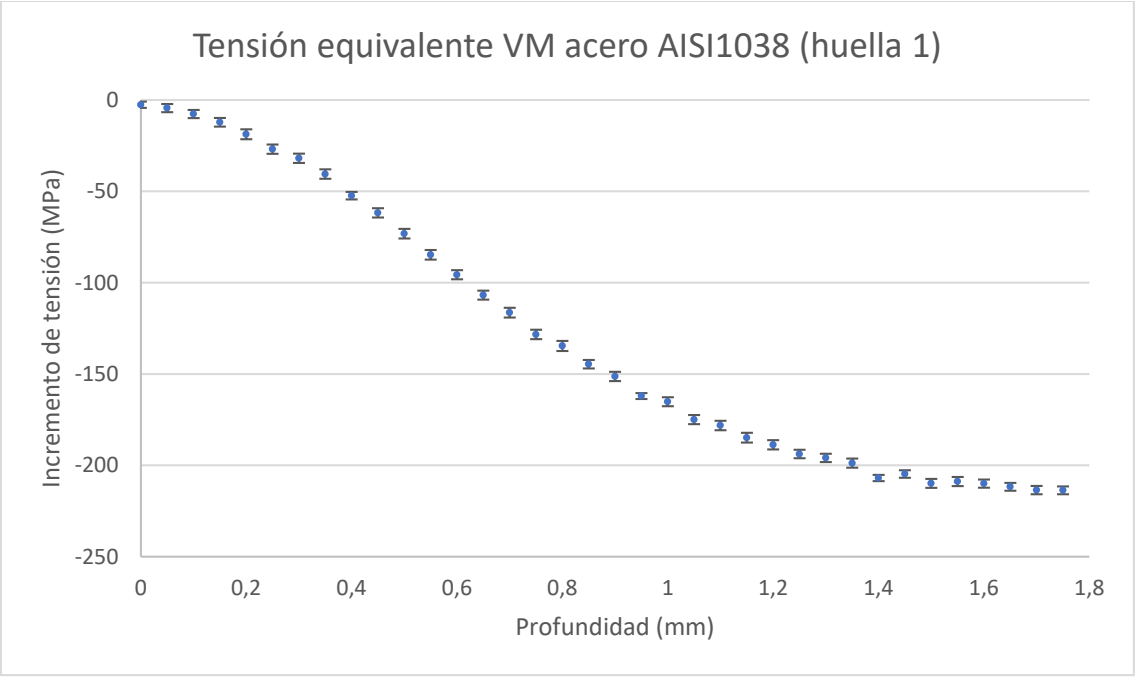


Figura 68. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 1 del acero AISI1038

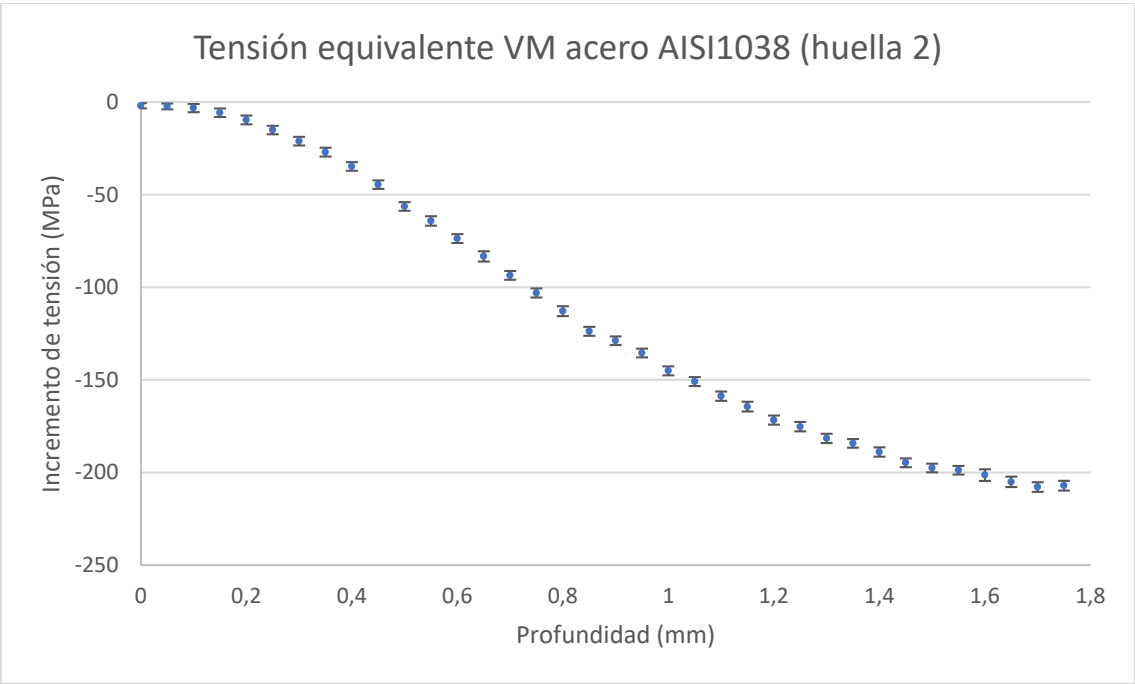


Figura 69. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 2 del acero AISI1038

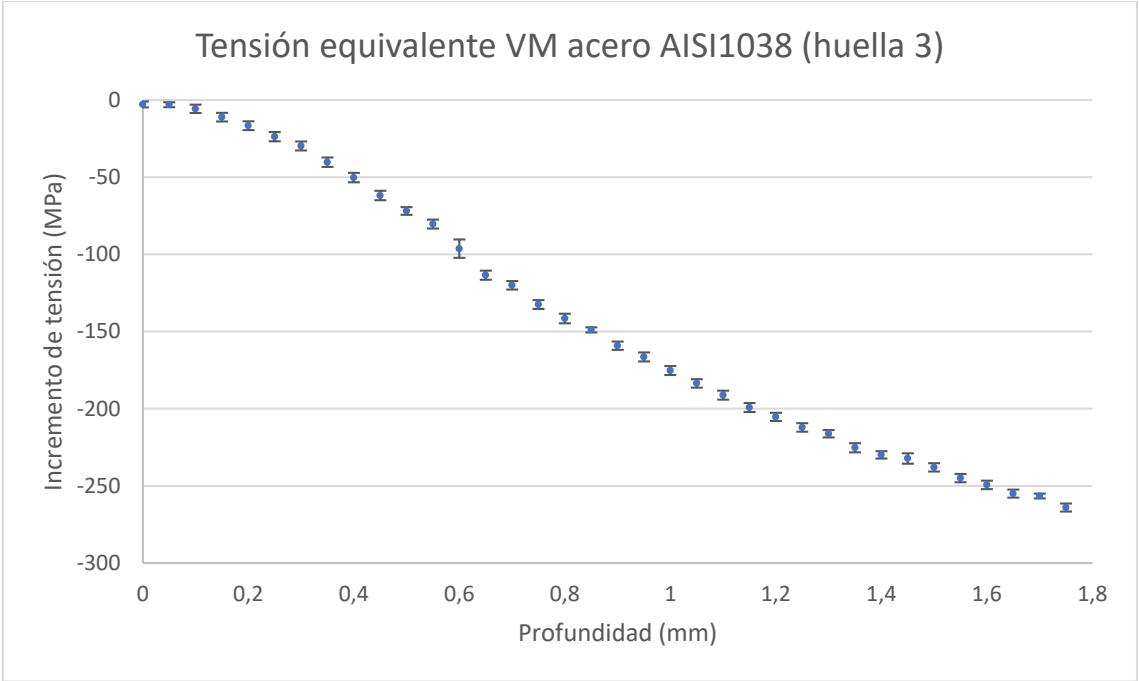


Figura 70. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 3 del acero AISI1038

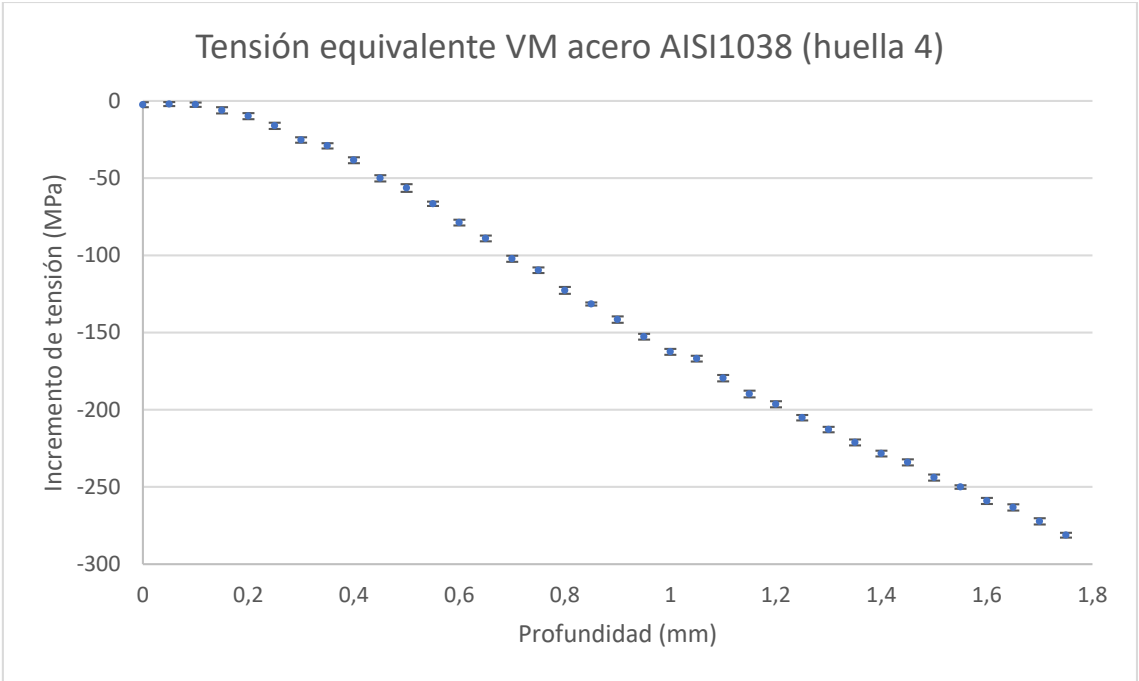


Figura 71. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 4 del acero AISI1038

## A6.2 Aluminio AA2017-T4

### A6.2.1 Elongaciones galgas extensiométricas

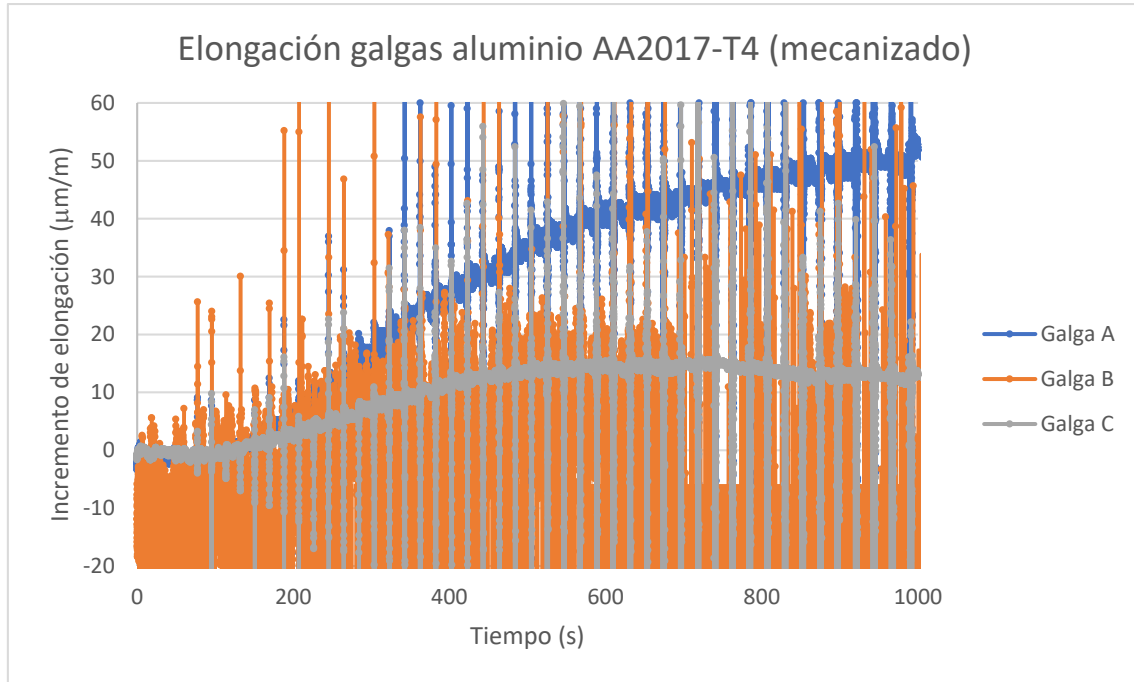


Figura 72. Elongación de las galgas en la superficie original del aluminio AA2017-T4

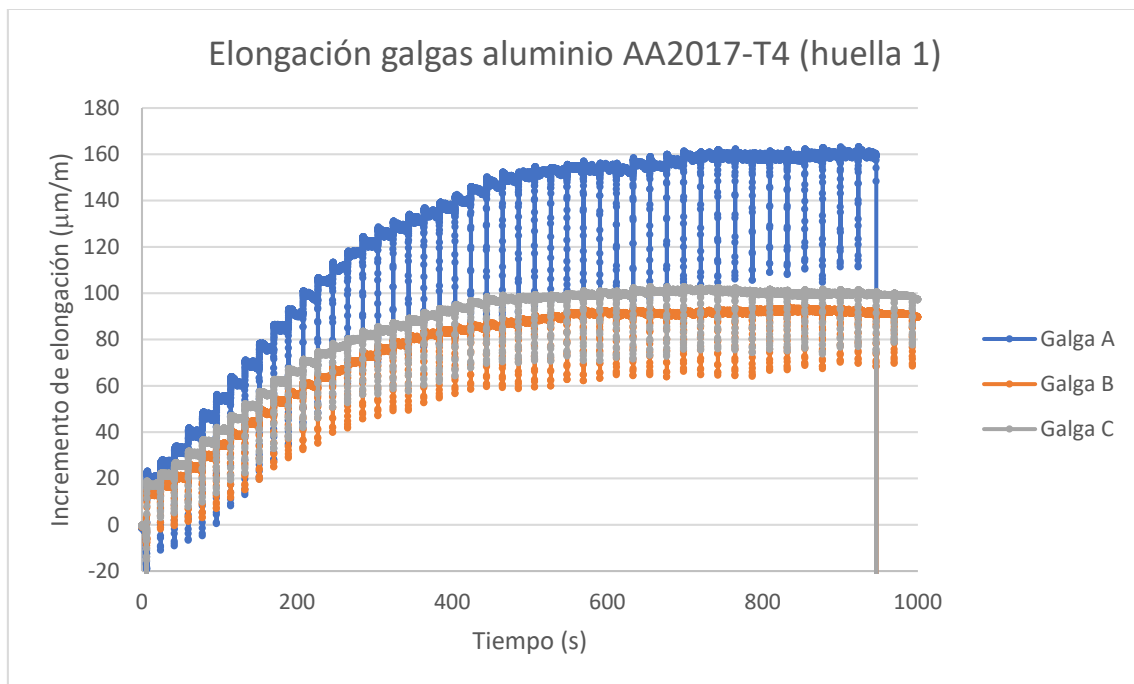


Figura 73. Elongación de las galgas en la huella 1 del aluminio AA2017-T4



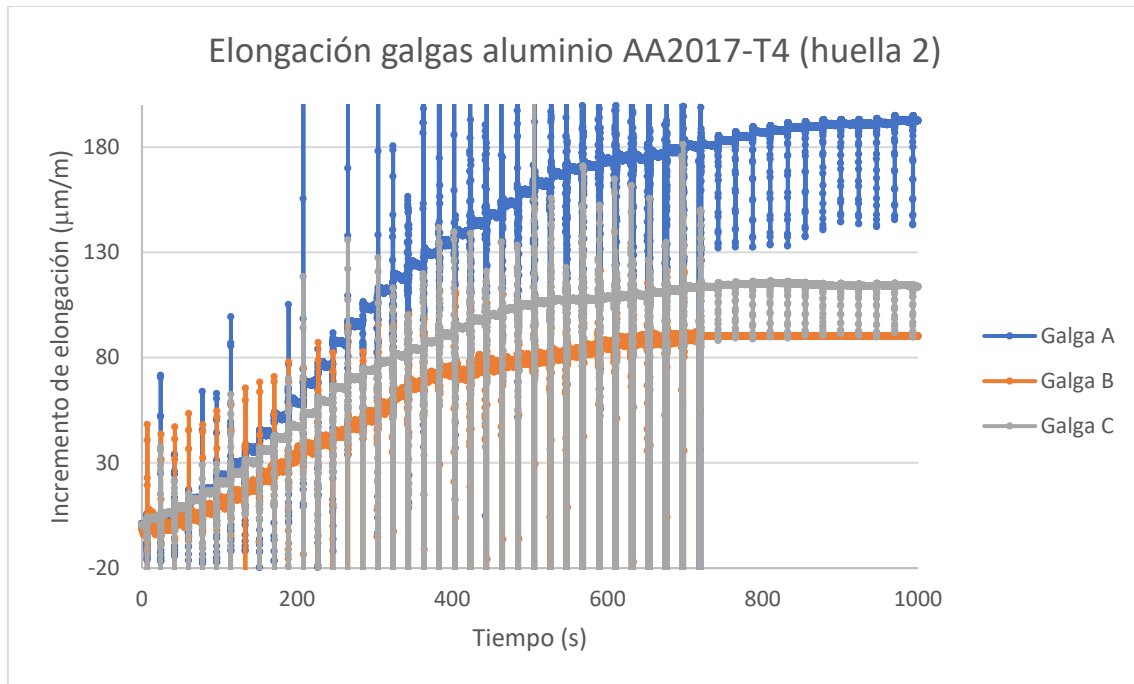


Figura 74. Elongación de las galgas en la huella 2 del aluminio AA2017-T4

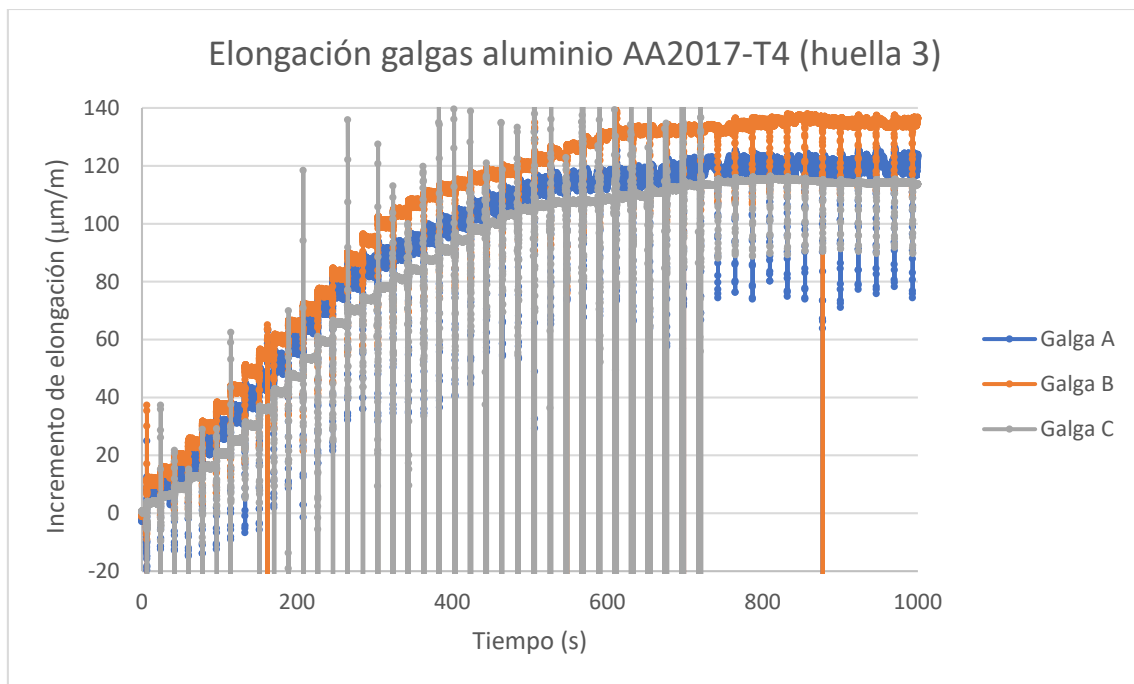


Figura 75. Elongación de las galgas en la huella 3 del aluminio AA2017-T4

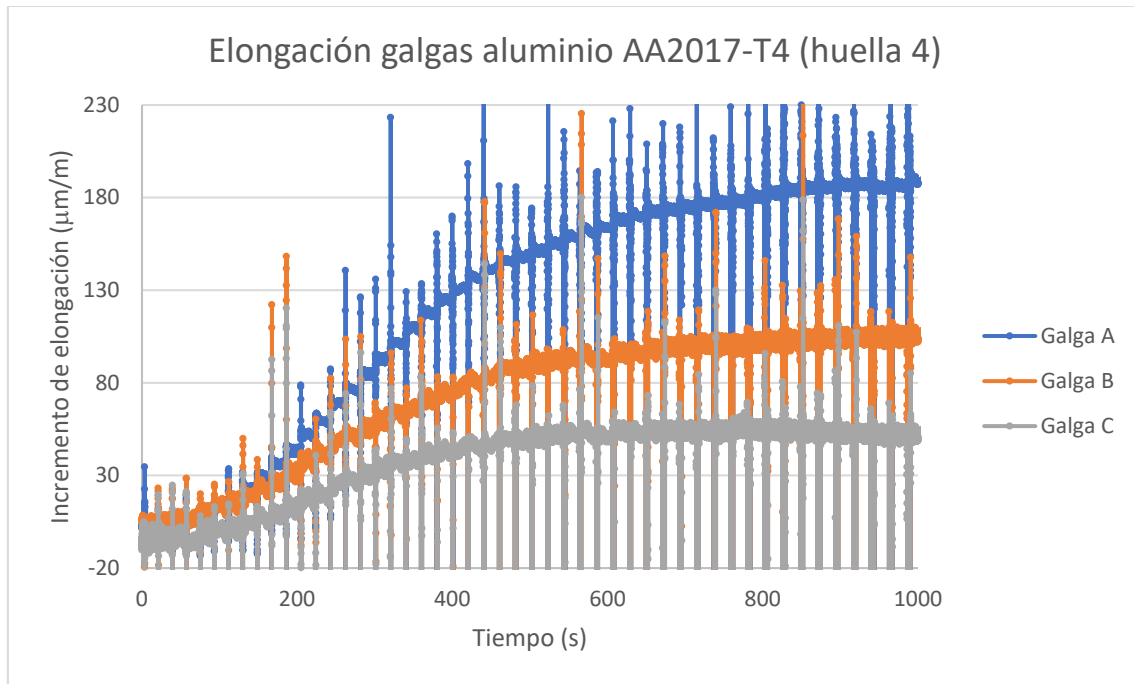


Figura 76. Elongación de las galgas en la huella 4 del aluminio AA2017-T4

### A6.2.2 Tensiones principales incrementales

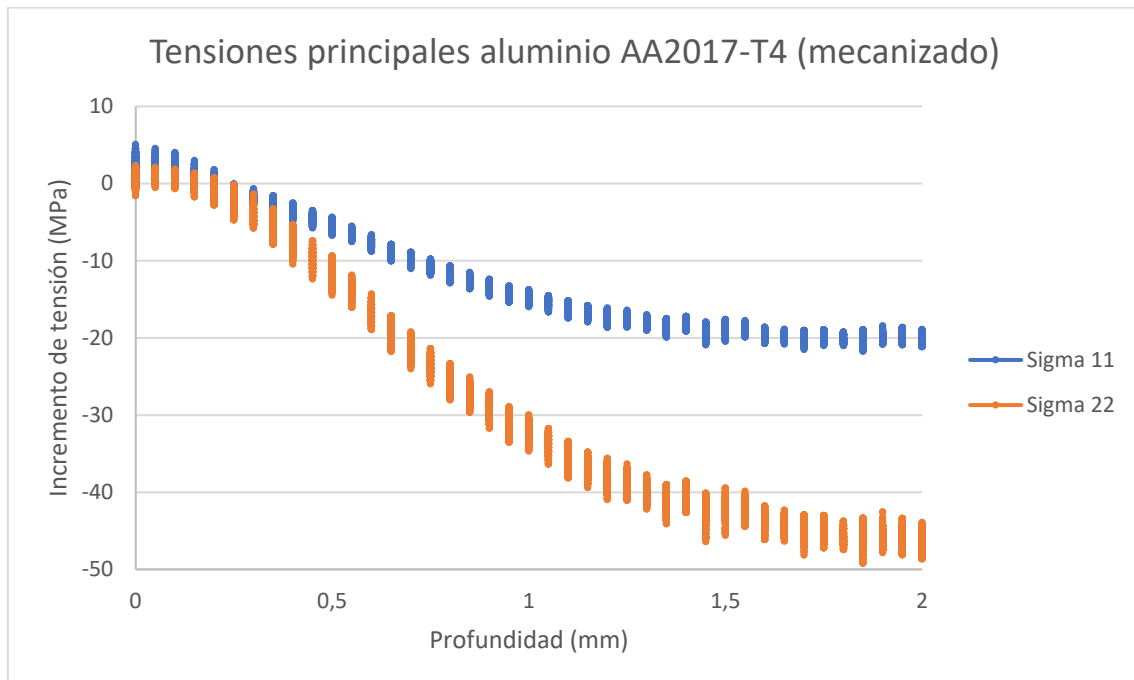


Figura 77. Incremento en las tensiones principales de la superficie original del aluminio AA2017-T4

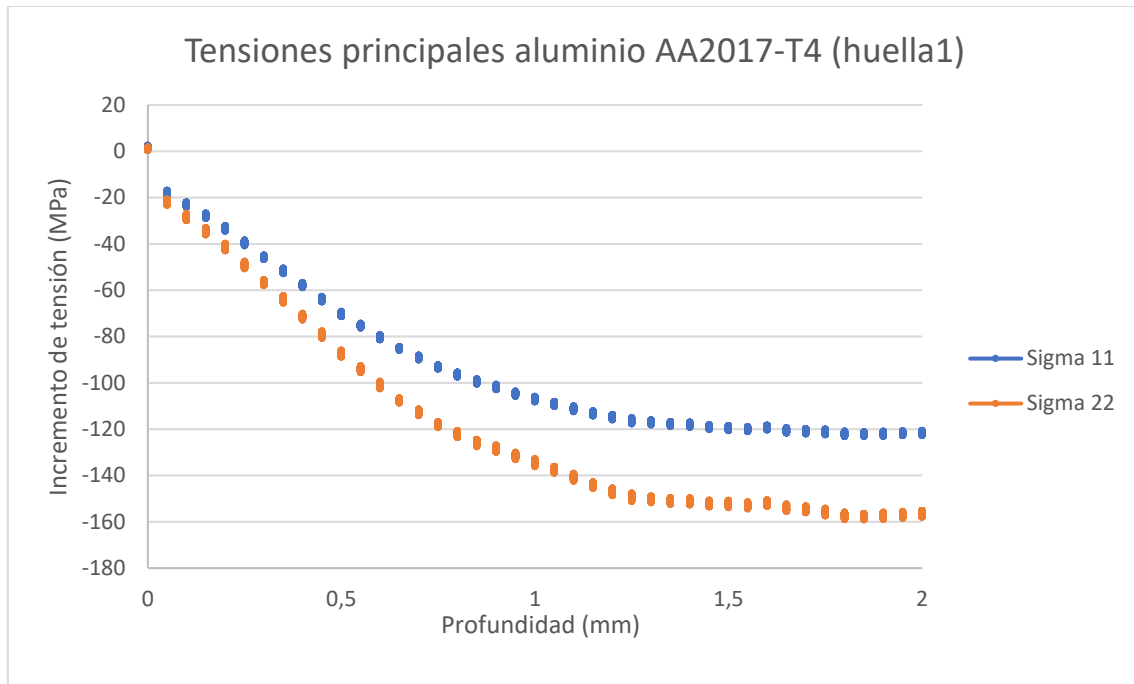


Figura 78. Incremento en las tensiones principales de la huella 1 del aluminio AA2017-T4

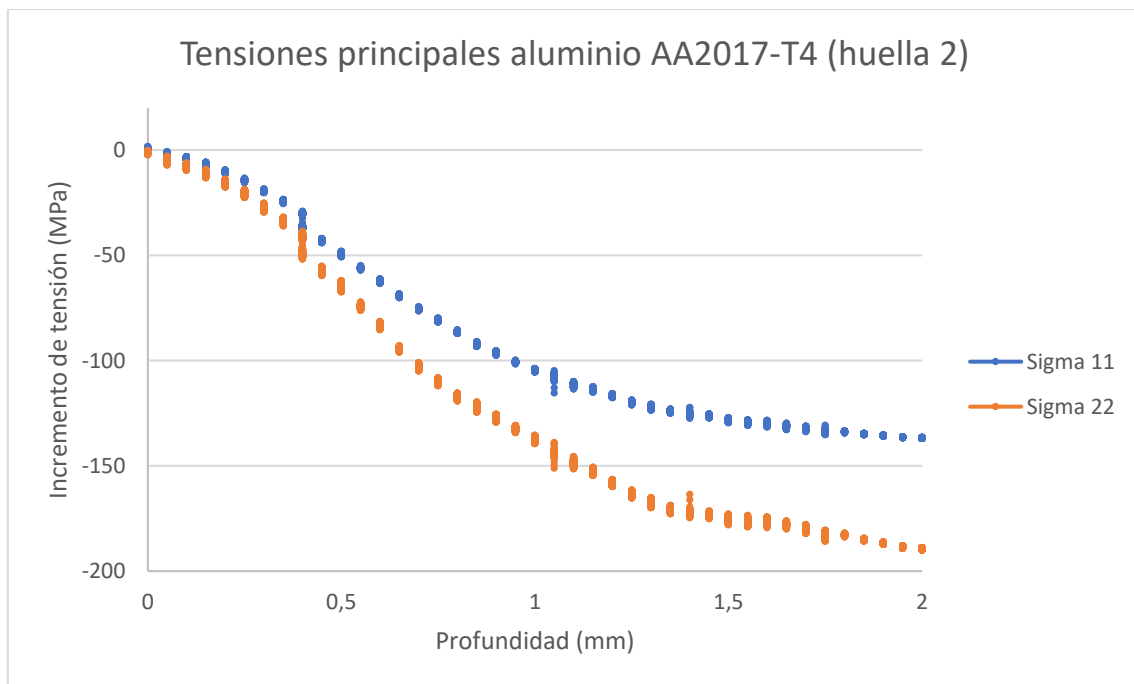


Figura 79. Incremento en las tensiones principales de la huella 2 del aluminio AA2017-T4

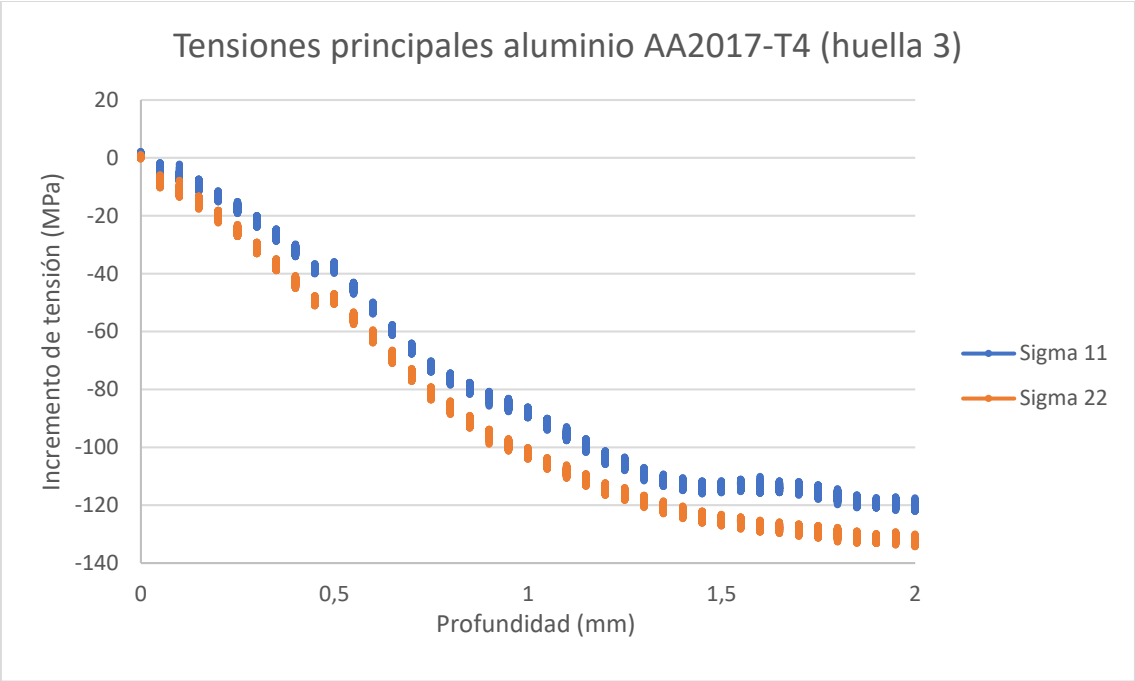


Figura 80. Incremento en las tensiones principales de la huella 3 del aluminio AA2017-T4

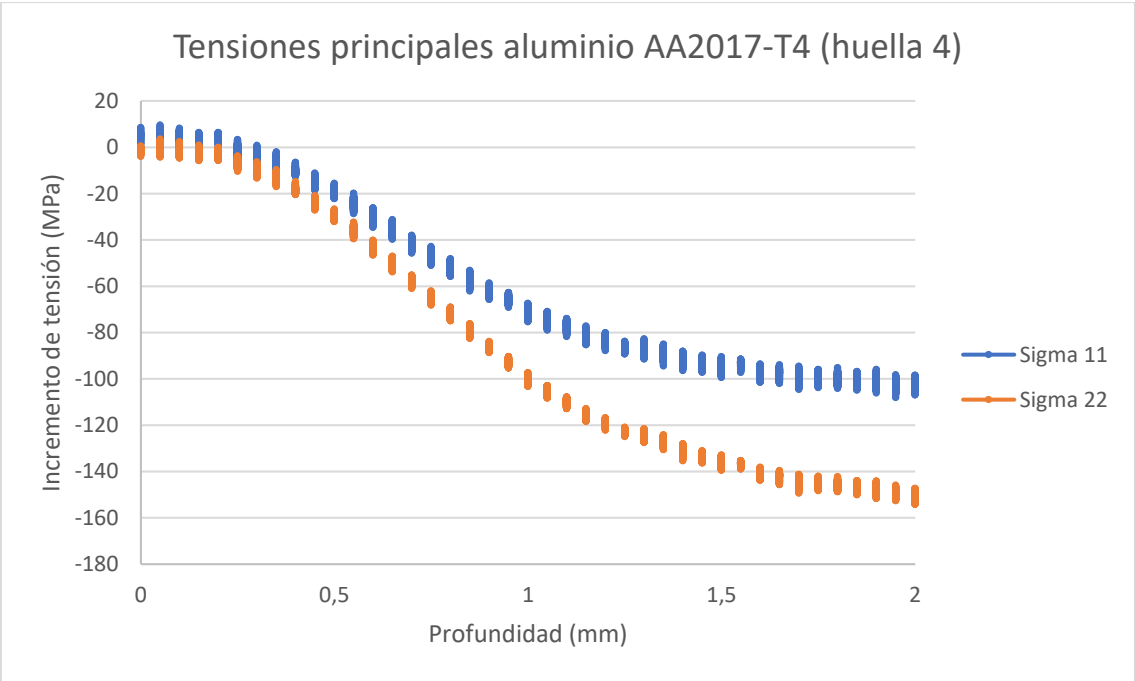


Figura 81. Incremento en las tensiones principales de la huella 4 del aluminio AA2017-T4

### A6.2.3 Tensión equivalente Von Misses

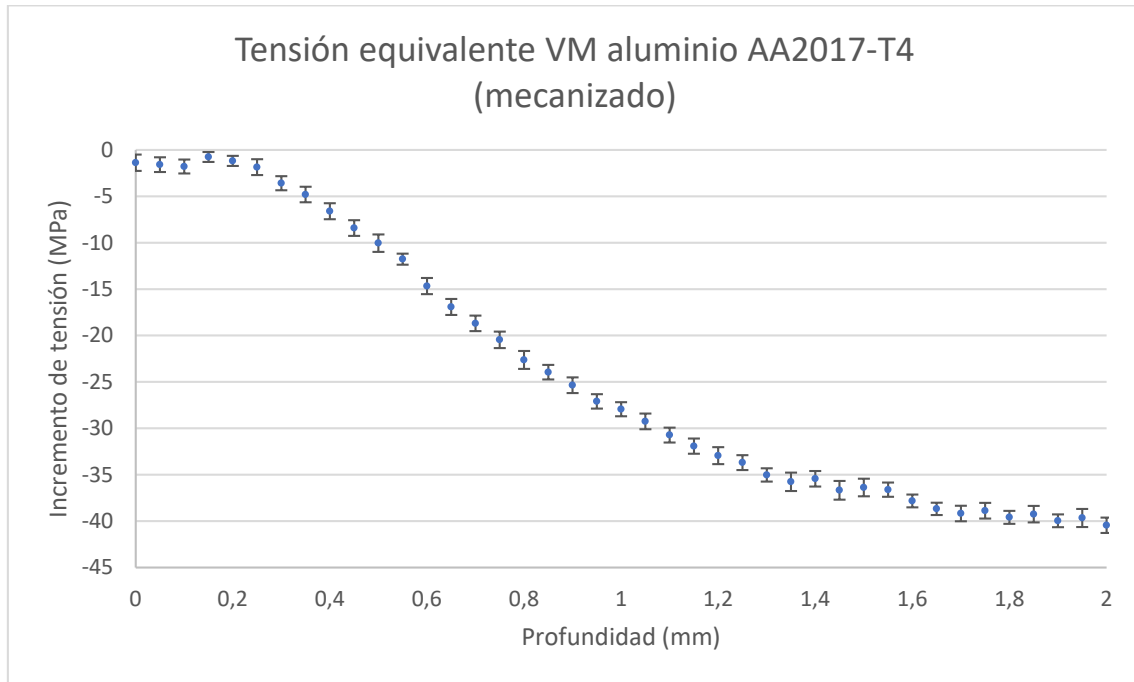


Figura 82. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la superficie original del aluminio AA2017-T4

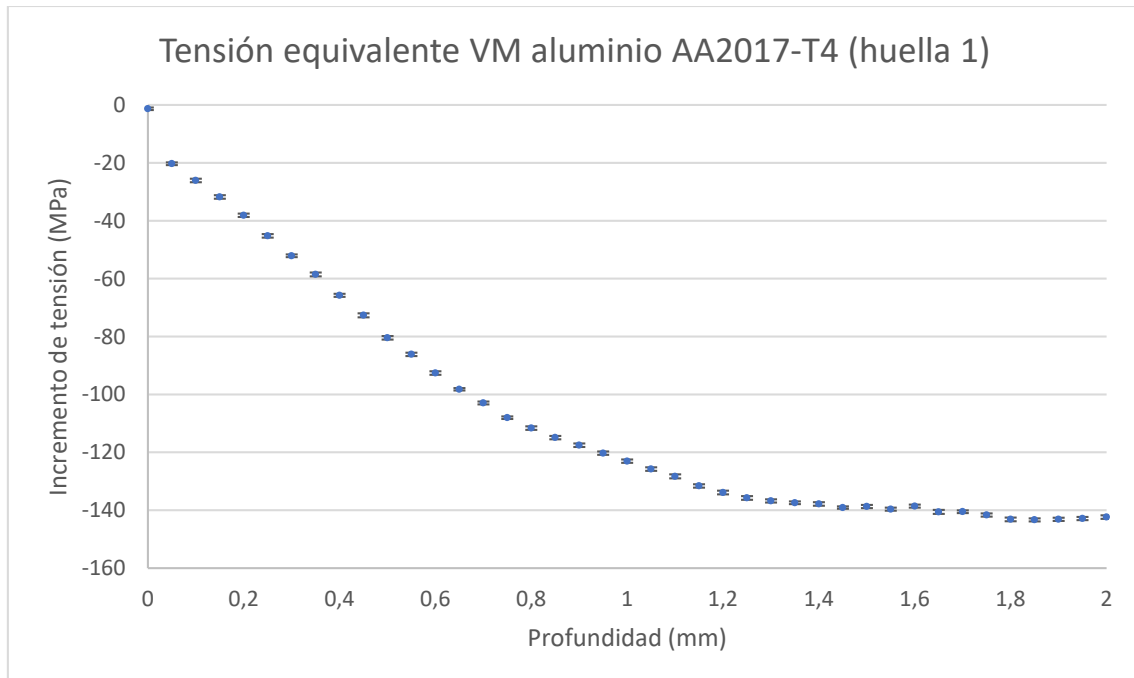


Figura 83. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 1 del aluminio AA2017-T4

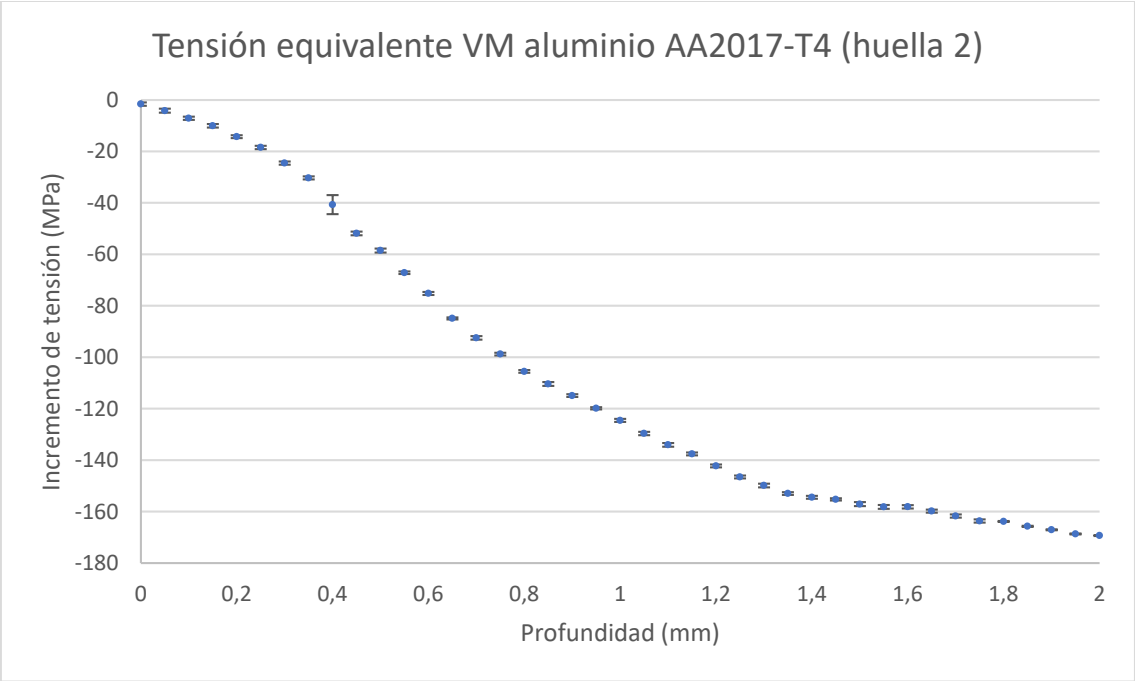


Figura 84. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 2 del aluminio AA2017-T4

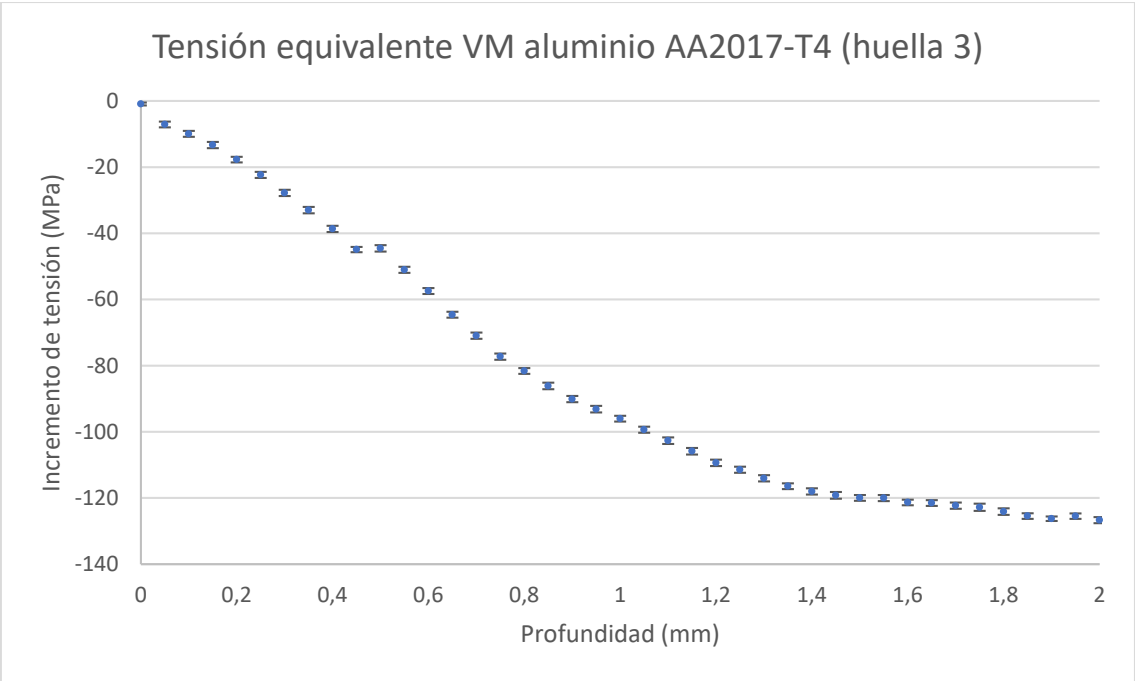


Figura 85. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 3 del aluminio AA2017-T4

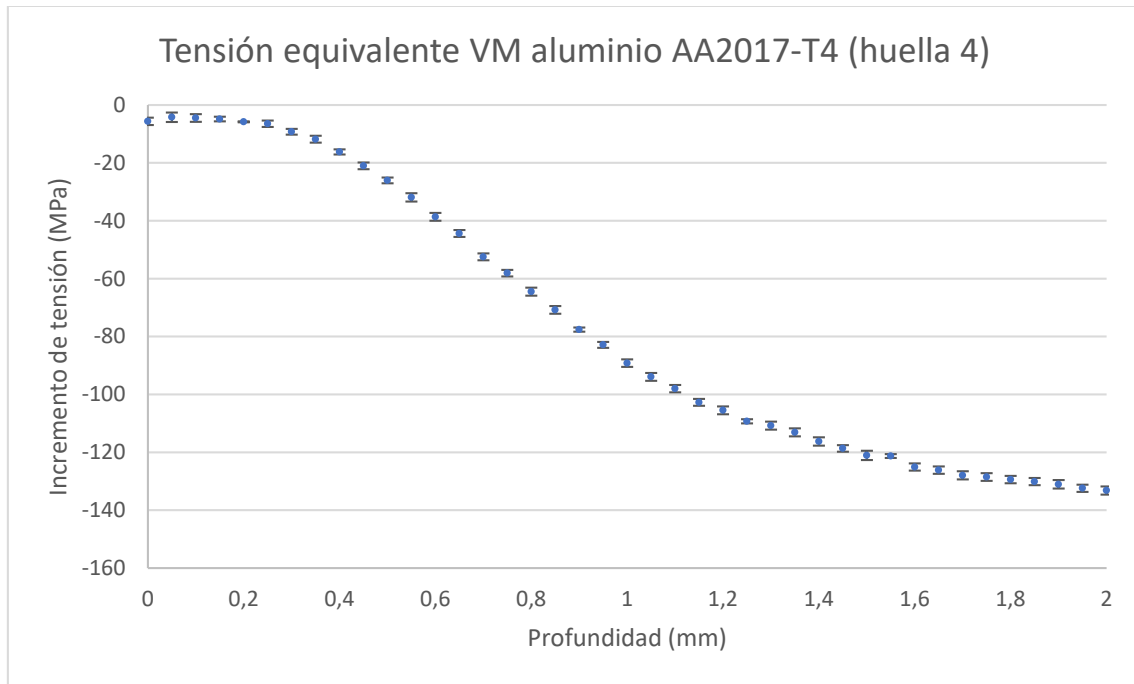


Figura 86. Incremento en la tensión equivalente de Von Mises en la huella 4 del aluminio AA2017-T4